

FERNANDO CARDOSO LUCAS FILHO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE
E DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOBRE
A RESISTÊNCIA DAS MADEIRAS DE
Pinus elliottii var. *elliottii* Engelm e *Pinus taeda* L.**

Dissertação apresentada à comissão examinadora,
como requisito parcial para a obtenção do grau
de Mestre em Ciências Florestais, na Área de
Concentração Tecnologia e Utilização de Produtos
Florestais do Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Florestal da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Moreschi

CURITIBA

1997



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

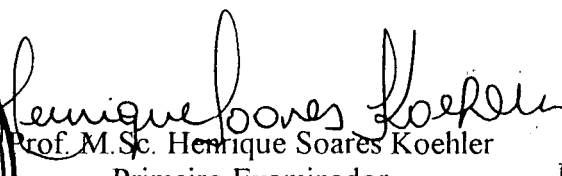
P A R E C E R

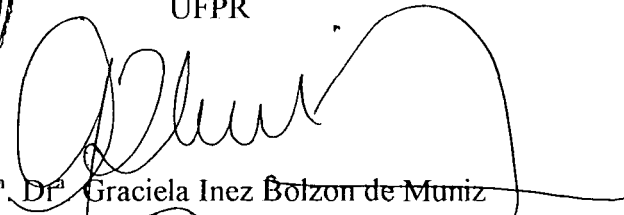
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **FERNANDO CARDOSO LUCAS FILHO**, sob o título “ **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE E DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE SOBRE A RESISTÊNCIA DAS MADEIRAS DE *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L.**”, para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Área de Concentração **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**.

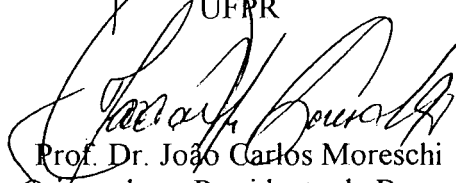
Após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato são de parecer pela “**APROVAÇÃO**” da Dissertação, com média final: (*8,6*), correspondente ao conceito: (*A*).

Curitiba, 27 DE JUNHO DE 1997




Prof. M.Sc. Henrique Soares Koehler
Primeiro Examinador
UFPR


Prof.^a Dr.^a Graciela Inez Boltzon de Muniz
Segunda Examinadora
UFPR


Prof. Dr. João Carlos Moreschi
Orientador e Presidente da Banca
UFPR

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Carlos Moreschi, pela valiosa orientação na realização deste trabalho;

Ao Prof. Co-orientador Jorge Mattos, pela contribuição e acompanhamento do trabalho;

Ao Prof. Co-orientador Sidon Keinert Jr., por suas sugestões e colaboração;

Aos professores Dr. Amauri Simioni, Setsuo Iwakiri, Umberto Klock, Lincoln Lopes Teixeira e Graciela Bolzon Muñiz, por suas sugestões;

Aos técnicos de laboratório Ademir, Ricardo e Vitor, pela valiosa ajuda na coleta e preparo do material;

Ao Engenheiro Marcelo Borges e à Empresa Forex Importadora e Exportadora de Madeiras S.A. e funcionários pelo fornecimento do material;

Às bibliotecárias da Embrapa Florestas e da Biblioteca do Setor de Ciências Agrárias da UFPR, pelo auxílio na obtenção de material bibliográfico e revisão bibliográfica;

À área de Concentração Tecnologia E Utilização de Produtos Florestais do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, por possibilitar a realização do meu mestrado;

A todos os demais professores, funcionários e amigos do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal que, direta ou indiretamente, colaboraram para realização deste trabalho;

À Universidade do Amazonas e à CAPES, pela oportunidade de realização deste trabalho;

À minha família, pela compreensão, motivação e colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.

*Em homenagem
aos meus pais,
esposa e filhos
Ofereço*

*Às minhas irmãs e
Amigos*

Dedico

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURA.....	VII
LISTA DE TABELAS	IX
RESUMO	XII
SUMMARY.....	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS DA TRABALHO.....	2
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS ESTUDADAS.....	4
2.1.1 CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS DO <i>Pinus elliottii</i> VAR. <i>elliottii</i> ENGELM.....	4
2.1.2 CARACTERÍSTICA ANATÔMICAS DO <i>Pinus taeda</i> L.....	6
2.2 CARACTERÍSTICAS VISUAIS INDICADORAS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	7
2.2.1 LARGURA DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO.....	7
2.2.2 PORCENTAGEM DE LENHO TARDIO	8
2.2.3 LENHO ADULTO E JUVENIL (IDADE DA MADEIRA)	8
2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA	12
2.3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	12
2.3.2 ELASTICIDADE DA MADEIRA	13
2.3.3 RESISTÊNCIA DA MADEIRA.....	15
2.4 FATORES QUE INFLUEM NA RESISTÊNCIA.....	16
2.4.1 INFLUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA	17
2.4.2 INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA	20

2.4.2.1 Relação água-madeira.....	20
2.4.2.2 Relações entre resistência da madeira e seu teor de umidade	22
2.4.2.3 Coeficiente de influência do teor de umidade	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	32
3.2 COLETA E PREPARO DO MATERIAL.....	32
3.3 ALEATORIZAÇÃO E OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS.....	35
3.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA -MADEIRA.....	36
3.4.1 TEOR DE UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE.....	36
3.4.2 AVALIAÇÃO DO GRADIENTE DE UMIDADE.....	37
3.5 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS VISUAIS	38
3.5.1 PORCENTAGEM MÉDIA DE LENHO TARDIO.....	38
3.5.2 LARGURA MÉDIA DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO	39
3.5.3 NÚMERO MÉDIO DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO	39
3.6 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	40
3.6.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA	40
3.6.1.1 Variação do limite elástico com o teor de umidade da madeira.....	42
3.6.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA À GRÃ	43
3.6.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO	44
3.6.4 AVALIAÇÃO DA RIGIDEZ POR ENSAIO NÃO DESTRUTIVO	45
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 GRADIENTE DE UMIDADE NOS CORPOS DE PROVA.....	47

4.2 VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS COM O TEOR DE	
 UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE.....	49
4.2.1 FLEXÃO ESTÁTICA	49
4.2.1.1 Estimativa do módulo de elasticidade.....	54
4.2.1.2 Estimativa do módulo de ruptura	59
4.2.2 VARIAÇÃO DA RAZÃO ENTRE A TENSÃO NO LIMITE ELÁSTICO E A TENSÃO DE	
 RUPTURA COM O TEOR DE UMIDADE	62
4.2.3 COMPRESSÃO PARALELA À GRÃ	63
4.2.3.1 Estimativa do módulo de elasticidade.....	69
4.2.3.2 Estimativa do módulo de ruptura	69
4.2.3.3 Comparação dos MOE's obtidos em testes de flexão estática e compressão	
paralela à grã.....	72
4.2.4 CISALHAMENTO NA DIREÇÃO TANGENCIAL AOS ANÉIS DE CRESCIMENTO.....	73
4.2.4.1 Estimativa da tensão de cisalhamento tangencial	75
4.2.5 CISALHAMENTO RADIAL	77
4.2.5.1 Estimativa da tensão de cisalhamento na direção radial	80
4.2.6 RIGIDEZ NO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO	81
4.3 CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS VISUAIS DA MADEIRA COM	
 AS PROPRIEDADES MECÂNICAS	85
5 CONCLUSÕES.....	89
6 RECOMENDAÇÕES	92
7 ANEXOS	93
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA, NA TRANSIÇÃO ENTRE LENHO ADULTO E JUVENIL. (BENDTSEN, 1978)	9
FIGURA 2 - VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DAS CÉLULAS COM A IDADE DA ÁRVORE.	10
FIGURA 3 - DIAGRAMA DA RELAÇÃO TENSÃO/DEFORMAÇÃO.....	14
FIGURA 4 - RESISTÊNCIA DA MADEIRA VERDE E DA MADEIRA SECA AO AR.....	23
FIGURA 5 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A UMIDADE DA MADEIRA	25
FIGURA 6 - EFEITO DA CLIMATIZAÇÃO DA MADEIRA NA RELAÇÃO UMIDADE/ RESISTÊNCIA.	29
FIGURA 7 - ESQUEMA UTILIZADO PARA CLASSIFICAÇÃO DOS VIGOTES.	34
FIGURA 8 - ESQUEMA DE RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA.....	35
FIGURA 9 - ESQUEMA DE RETIRADA DE SUBAMOSTRAS PARA AVALIAÇÃO DO GRADIENTE DE UMIDADE.	38
FIGURA 10 - ESQUEMA DE CARREGAMENTO NO TESTE DE FLEXÃO ESTATICA..... (ASTM-D143)	41
FIGURA 11 - CORPO DE PROVA PARA O TESTE DE COMPRESSÃO PARALELA À GRÃ.....	44
FIGURA 12 - CORPO DE PROVA PARA O TESTE DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO. (SEGUNDO A NORMA ASTM -D143).	45
FIGURA 13 - ESQUEMA DE CARREGAMENTO EM MÁQUINA DE TESTES NÃO DESTRUTIVOS.	46
FIGURA 14 - TENDÊNCIAS DE VARIAÇÃO DO MOR E DO MOE COM A UMIDADE DA MADEIRA...	52
FIGURA 15- TENDÊNCIAS DE VARIAÇÃO DO MOR E DO MOE COM A MASSA ESPECÍFICA APARENTE.	52
FIGURA 16 - VARIAÇÃO DO MOE COM O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA PARA VÁRIAS MASSAS ESPECÍFICAS APARENTE.....	60
FIGURA 17 - VARIAÇÃO DO MOR COM A UMIDADE DA MADEIRA PARA VÁRIAS MASSAS ESPECÍFICAS APARENTE.....	62
FIGURA 18 - CURVA CARGA/DEFORMAÇÃO PARA MADEIRAS VERDE E SECA ATÉ 12 % DE UMIDADE.....	64
FIGURA 19 - VARIAÇÃO DO MOR E DO MOE COM A UMIDADE DA MADEIRA.	65
FIGURA 20 - VARIAÇÃO DO MOR E DO MOE COM A MASSA ESPECÍFICA APARENTE.	65

FIGURA 21 - VARIAÇÃO DO MOR EM COMPRESSÃO PAREALELA À GRÃ COM A UMIDADE DA MADEIRA PARA VÁRIAS MASSAS ESPECÍFICAS APARENTE.	72
FIGURA 22 - VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO TANGENCIAL COM A UMIDADE E COM A MASSA ESPECÍFICA APARENTE.	73
FIGURA 23 - VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO TANGENCIAL COM O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA PARA VÁRIAS MASSAS ESPECÍFICAS APARENTE.	76
FIGURA 24 - VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL COM A UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA MADEIRA.	77
FIGURA 25 - VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL COM O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA PARA VÁRIAS MASSAS ESPECÍFICAS APARENTE.	81
FIGURA 26 - VARIAÇÃO DA FLECHA COM O TEOR DE UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE PARA <i>Pinus elliottii</i>	82
FIGURA 27 - VARIAÇÃO DA FLECHA COM O TEOR DE UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE PARA <i>Pinus taeda</i>	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS NOS LENHOS JUVENIL E ADULTO DE MADEIRAS DE <i>Pinus elliottii</i> E <i>Pinus taeda</i> COM 18 ANOS DE IDADE.	11
TABELA 2 - VARIAÇÃO DE MOE, MOR E TENSÃO NO LIMITE DE PROPORCIONALIDADE COM O TIPO DE LENHO, PARA MADEIRA DE <i>Pinus elliottii</i> E <i>Pinus taeda</i> L C/ 30 ANOS DE IDADE.	11
TABELA 3 - VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE COM O COMPRIMENTO DOS CORPOS DE PROVA PARA AS DUAS ESPÉCIES TESTADAS.	50
TABELA 4 - VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE COM A ESPESSURA DOS CORPOS DE PROVA PARA AS DUAS ESPÉCIES TESTADAS.	51
TABELA 5 - VALORES DE CORRELAÇÃO (R) ENTRE O MOR E MOE DO ENSAIO DE FLEXÃO ESTATICA COM AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA.	53
TABELA 6 - VALORES MÉDIOS DE MOR DE ACORDO COM O TIPO DE LENHO.	54
TABELA 7 - VALORES MÉDIOS DE MOE DE ACORDO COM O TIPO DE LENHO.	54
TABELA 8 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES MÉDIOS DE MOR E MOE PARA TEORES DE UMIDADE ABAIXO DE 10% E ACIMA DE 30%.	56
TABELA 9 - VALORES MÉDIOS DE MOR PARA DUAS CLASSES DE UMIDADE.	57
TABELA 10 - VALORES MÉDIOS DE MOE PARA DUAS CLASSES DE UMIDADE.	58
TABELA 11 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE COM SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.	59
TABELA 12 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DO MÓDULO DE RUPTURA E SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.	61
TABELA 13 - COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DA RELAÇÃO $T_{LIM}/T_{RUPT.}$ NO ENSAIO DE FLEXÃO ESTATICA COM O VALOR 0,562. (9/16)	63
TABELA 14 - CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS, A MASSA ESPECÍFICA APARENTE E O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA.	66
TABELA 15 - VALORES MÉDIOS DE MOR PARA DIFERENTES CLASSES DE UMIDADE E LENHO.	67

TABELA 16 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE PARA AS DUAS ESPÉCIES.	68
TABELA 17 - VALORES MÉDIOS DE MOE PARA DIFERENTES CLASSES DE UMIDADE E LENHO.	69
TABELA 18 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, E SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.	70
TABELA 19 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADOS PARA ESTIMATIVA DO MÓDULO DE RUPTURA, E SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.	71
TABELA 20 - COMPARAÇÃO DO MOE EM FLEXÃO ESTÁTICA COM O MOE EM COMPRESSÃO PARALELA.	72
TABELA 21 - CORRELAÇÕES ENTRE A TENSÃO DE CISALHAMENTO NA DIREÇÃO TANGENCIAL AOS ANÉIS DE CRESCIMENTO, MASSA ESPECÍFICA APARENTE E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA.	74
TABELA 22 - VALORES MÉDIOS DE TENSÃO DE CISALHAMENTO TANGENCIAL PARA DIFERENTES CLASSES DE UMIDADE E LENHO.	73
TABELA 23 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA DIREÇÃO TANGENCIAL AOS ANÉIS DE CRESCIMENTO, E SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.	76
TABELA 24 - CORRELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E A TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL.	78
TABELA 25 - VALORES MÉDIOS DE TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL PARA DIFERENTES CLASSES DE UMIDADE E LENHO.	79
TABELA 26 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL E SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.	80
TABELA 27 - CORRELAÇÃO ENTRE A FLECHA NO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO E AS PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA.	83
TABELA 28 - COMPARAÇÃO DOS MOE'S OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA E NO MÉTODO NÃO DESTRUTIVO.	84
TABELA 29 - VALORES MÉDIOS DE FLECHA NOS LENHOS ADULTO E JUVENIL PARA AS ESPÉCIES ESTUDADAS.	84

TABELA 30- CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS COM AS CARACTERÍSTICAS VISUAIS DA MADEIRA.	86
---	----

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo o estudo da influência do teor de umidade e da massa específica aparente sobre algumas propriedades mecânicas da madeira, e a avaliação de algumas características visuais como indicadoras dessas propriedades nas madeiras de *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm e *Pinus taeda* L. provenientes de plantios com 21 anos de idade, localizados no município de Três Barras, Santa Catarina. Foram estudadas a variação das resistências à flexão, à compressão paralela à grã e cisalhamento, com variações do teor de umidade para cada espécie, nos lenhos adulto e juvenil. Os resultados obtidos mostraram diferenças significativas entre as relações resistência/teor de umidade nos lenhos adulto e juvenil; para ambas as espécies, os módulos de ruptura, tanto em flexão como em compressão, foram mais afetados pela variação do teor de umidade do que o módulo de elasticidade. A madeira de *Pinus elliottii* foi mais afetada pela variação do teor de umidade e o lenho adulto das duas espécies obteve maior ganho de resistência com a secagem que o lenho juvenil. O módulo de elasticidade em flexão estática aumentou moderadamente, cerca de 20%, e em compressão paralela praticamente não houve ganho com a secagem. A massa específica aparente mostrou alta correlação com a resistência. Os modelos matemáticos testados para estimativa da resistência da madeira em função dos teores de umidade e massas específicas aparentes foram satisfatórios para a resistência à flexão estática, compressão paralela e cisalhamento na direção radial e tangencial aos anéis de crescimento, mas não para a estimativa da elasticidade. As características visuais apresentaram razoável correlação com a elasticidade e são recomendadas apenas como instrumento auxiliar na avaliação da rigidez da madeira das duas espécies. A relação dessas características com a resistência não foi significativa, por consequência, não podem ser utilizadas como indicadoras da qualidade da madeira.

SUMMARY

The research objectived the study of the influence of moisture content and gravity on some mechanical properties of wood of *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm. and *Pinus taeda* L. obtained from plantations at Três Barras, Santa Catarina with 21 yers-old. In addition it was also studied visual characteristics as indicators of those mechanical properties. It was studied the variations of static bending, compression parallel to the grain and shear with moisture content variations on juvenile and adult wood. The results showed significant differences between strength/moisture content relationship on static bending and compression to both juvenile and adult of the two species. The modulus of rupture were most affected than modulus of elasticity and also the wood of *Pinus elliottii* was most affected than *Pinus taeda* with moisture content changing. There was more increasing on strength with drying on the adult wood than on juvenile wood of both species. The modulus of elasticity on static bending increasing its value by about 20% with drying, while on the compression parallel to the grain there was no gain. The gravity showed significant correlation with strength. The mathematical models used to test the estimating of the strength of wood as function of the moisture content and gravity were satisfactory to static bending, compression parallel to the grain and shear on the radial and tangential directions, but not to the elasticity. The visual characteristics showed fair correlations with elasticity and are recommended only as an auxiliary tool to its evaluation. The relationship between the visual characteristics and strength were not significant and therefore they are not good indicators of the wood quality.

1 INTRODUÇÃO

A demanda por madeira serrada para fins estruturais na Região Sul do Brasil tem feito com que o mercado adote para consumo, várias madeiras provenientes de reflorestamentos, entre elas, as de *Pinus elliottii* e de *Pinus taeda*, como alternativa às várias madeiras de folhosas comumente utilizadas na construção civil, seja por aspectos legais como crescimento das restrições à exploração de florestas naturais, ou econômicos, como custos de exploração e transporte até os grandes centros consumidores do Sul do País.

A solução para diferentes problemas práticos já foram alcançadas, utilizando-se racionalmente a madeira dessas espécies. Contudo, o conhecimento preciso das propriedades mecânicas para sua utilização adequada é fundamental, e fornece parte dos subsídios necessários para que se possa utilizar este recurso com economia e segurança.

Tal solução passa pelo conhecimento dos fatores que contribuem para uma maior resistência e rigidez da madeira, entre eles, o entendimento da sua variação com variações nos teores de umidade e massas específicas.

A grande variabilidade dos resultados obtidos até hoje, nos estudos desenvolvidos com madeiras do gênero *Pinus sp.* para fins estruturais, sugere a utilização de uma taxa redutora ou fator de correção da tensão admissível de até 80% devido as incertezas das propriedades mecânicas. O conhecimento mais preciso destes coeficientes é útil para melhor classificar as peças estruturais e, assim, evitar o superdimensionamento.

O presente estudo proporcionou condições para avaliação da resistência e da rigidez em níveis de teores de umidade e massas específicas que ocorrem na prática, uma vez que num mesmo lote de madeira existem variações destas, atribuídas à secagem proporcionada ao

material ou à sua formação. As características físicas e morfológicas podem também ser indicadores da qualidade e, por conseguinte, da utilização mais econômica deste recurso.

De modo geral, este trabalho é uma contribuição ao melhor entendimento do comportamento da madeira como material de construção e também, uma contribuição à revisão da Norma Brasileira para Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira, visando a classificação da madeira em função do seu teor de umidade e de sua massa específica aparente.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Devido a necessidade de conhecermos o quanto e como variam as propriedades mecânicas com as variações do teor de umidade e da massa específica aparente e, relacionar algumas características visuais a estas propriedades para melhor classificação das madeiras, foram determinados os objetivos do presente estudo.

Os objetivos gerais foram:

Avaliar a influência do teor de umidade e da massa específica aparente na resistência e na rigidez de peças de madeiras, das espécies *Pinus elliottii* Engelm e *Pinus taeda* L, em ensaios de flexão estática, compressão paralela e cisalhamento, e definir um modelo matemático que melhor represente esta relação;

Objetivos específicos:

Estimar o aumento ou a redução de resistência por percentual de variação do teor de umidade e da massa específica aparente da madeira;

Estudar as características visuais da madeira como indicadores das propriedades mecânicas;

Comparar o módulo de elasticidade obtido a partir do ensaio de compressão paralela, com o obtido no ensaio de flexão estática com a finalidade de definir o melhor método de determinação;

Estudar o comportamento do limite de proporcionalidade com a variação do teor de umidade da madeira, e compara-los com o coeficiente de redução $9/16$, usado na derivação das tensões admissíveis.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MADEIRAS ESTUDADAS

2.1.1 CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS DO *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm.

A madeira das espécies do gênero *Pinus* tem sido estudada por muitos autores. Segundo KOLLMANN & COTÊ Jr.(1968), BARTZ (1973), BENDTSEN & SENFT (1986), DURLO (1988) e MUÑIZ (1993) a madeira das espécies do gênero *Pinus*, apresentam as seguintes características:

a) Anéis de crescimento distintos, transição do lenho inicial para lenho tardio brusca e alguns anéis estreitos alternando com anéis mais largos;

b) Pontuações areoladas do lenho inicial, com média de 29,2 μm de diâmetro tangencial e com aberturas arredondadas e 5,5 μm de diâmetro, dispostos em fileiras, principalmente unisseriadas, apresentando-se as vezes de forma oposta e alternada. No lenho tardio as pontuações são mais escassas e menores, variando de cerca de 6 μm até 18 μm de diâmetro de abertura, em forma de lenticulas de 2,5 a 6,5 μm , crássulas presentes;

c) Traqueóides axiais com secção poligonal no lenho inicial, sem meatos intercelulares. Espessos, de secção retangular e com diâmetro radial menor no lenho tardio. Comprimento dos traqueóides variando de 745,85 a 5985,99 μm , diâmetros de lúmen de 25 a 60 μm , paredes com 4,5 a 13 μm de espessura.

d) Traqueóides radiais providos de pares de pontuações areoladas, com diâmetro médio de 12,2 μm . Frequência de 2 a 9 raios/mm, de 40 a 330 μm de altura, com média de 141 μm e 1 a 14 células de altura;

e) Raios unisseriados e fusiformes. Tecido radial heterocelular, constituído por dois tipos de células, parênquimas e traqueóides radiais marginais. Raios unisseriados predominantes, as vezes localmente bisseriados, com uma ou mais fileiras de traqueóides radiais marginais e intercalados, com espessamento em identuras abundantes com forma ponteaguda, assemelhando-se a espessamento em espiral.

f) Células radiais de secção oval em plano tangencial, sem meatos no contato com traqueóides axiais. Campo de cruzamento com 1 a 6 pontuações do tipo pinóide. Raios fusiformes com canais resiníferos radiais, muito mais largos que os raios unisseriados, com média de 50 μm de diâmetro, 3 a 5 células de largura, 170 a 350 μm de altura, com média de 237,5 μm e 12 a 18 células de altura;

g) Canais resiníferos axiais e radiais, de origem esquizógena. Canais axiais com abundância variando de 0,3 a 5,8/mm². envolvidos por células epiteliais de paredes finas, mais frequentes próximo à medula;

Valores acima foram próximos aos observados também por TARAS (1965), MORESCHI (1975), MENDONÇA (1982) e RINCOSKI (1993).

2.1.2 CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS do *Pinus taeda* L.

Segundo MUÑIZ (1993), as características anatômicas da madeira são:

a) Anéis de crescimento distintos . Transição de lenho inicial para tardio brusca. Alguns anéis estreitos alternando com anéis mais largos.

b) Traqueóides axiais no lenho inicial, de secção poligonal sem meatos intercelulares e com paredes finas. No lenho tardio, de paredes mais espessas, secção retangular, com diâmetro radial menor; de 959,99 a 6675,74 μm de comprimento, de 32,5 a 72,5 μm de diâmetro externo e de 15 a 60,03 μm de diâmetro do lúmen; paredes de 5 a 13,6 μm de espessura.

c) Pontuações areoladas do lenho inicial com média de 30,5 μm de diâmetro, com aberturas arredondadas de 6,5 μm de diâmetro médio, em fileiras principalmente unisseriadas, apresentando-se as vezes de forma oposta e alternas. Pontuações areoladas do lenho tardio mais escassas, com diâmetro menor, média de 15,3 μm e abertura de 2,5 a 8 μm , com forma lenticular, de 5,5 μm de diâmetro. Crássulas presentes.

d) Raios predominantemente unisseriados, às vezes localmente bisseriados e fusiformes. Tecido radial heterocelular, de células procumbentes, com uma ou mais fileiras de traqueóides radial-marginais e intercalados. Raios unisseriados com 3 a 9 raios por mm, 50 a 350 μm de altura e 1 a 14 células de altura. Traqueóides radiais com identuras. Campo de cruzamento com 1 a 6 pontuações pinóides. Raios fusiformes com 51 μm de largura e 120 a 300 μm de altura.

e) Canais resiníferos axiais e radiais, de origem esquizógena. Canais axiais de 0,2 a 4,7 mm², com uma ou mais camadas de células epiteliais finas, menos freqüentes próximo à casca.

Estas características anatômicas, são similares às observadas por TOMASELLI (1979), estudando a qualidade da madeira de *Pinus taeda* L.

2.2 CARACTERÍSTICAS VISUAIS INDICADORAS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.

2.2.1 LARGURA DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO

Muitos pesquisadores tem obtido correlações entre a resistência da madeira e a largura dos anéis de crescimento. SPUUR & HSIUNG (1954) afirmaram que estas correlações possuem baixo grau de associação, ou não existem, pelo fato da largura dos anéis de crescimento decrescerem gradualmente da medula em direção à casca, em árvores normais. KLOCK (1989), sustenta que apenas a largura dos anéis não pode ser considerada uma variável muito segura para estimar a resistência da madeira.

A maioria dos autores, de forma geral, afirmam que, para folhosas de porosidade em anel e em coníferas de rápido crescimento, a correlação entre as propriedades mecânicas e a largura dos anéis de crescimento tem validade, se bem que os valores fornecidos só podem ser considerados como uma estimativa bastante superficial.

2.2.2 PORCENTAGEM DE LENHO TARDIO

A proporção entre os lenhos inicial e tardio é uma variável freqüentemente observada em numerosos estudos sobre a qualidade da madeira. Segundo MORESCHI (1975), a porcentagem de lenho tardio é uma variável que apresenta significativa afinidade com as propriedades de resistência.

Segundo BROWN *et alli* (1952), o efeito do lenho tardio na massa específica deve-se ao fato deste lenho conter maior quantidade de material lenhoso por unidade de volume, quando comparado ao lenho inicial. Isto torna-se evidente em coníferas, com transição abrupta do lenho inicial para o lenho tardio. Vários estudos têm demonstrado sua relação direta com a porcentagem de lenho tardio (KOCH, 1972).

TARAS (1965), estudando algumas propriedades da madeira de *Pinus elliottii* e suas relações com a idade, para cada tipo de lenho produzido pela espécie, observou que houve um decréscimo de massa específica do lenho inicial com o aumento da idade, estabilizando-se depois de 8 a 12 anos. Por outro lado, a massa específica do lenho tardio aumentou rapidamente neste período de crescimento, estabilizando num certo estágio (MENDONÇA, 1982).

Segundo KNIGGE & SCHULZ (1966) e GURFINKEL (1973), a proporção de lenho tardio é de grande interesse para as propriedades mecânicas da madeira, por existir altas correlações entre elas. Portanto, quanto maior a proporção deste, maior será a resistência da madeira, o que é facilmente observável em coníferas.

VORREITER (1949), estudando a madeira do gênero *Pinus*, observou que o lenho tardio atingiu uma resistência de 2510 kgf/cm² em ensaio de flexão estática, aproximadamente 4,5 vezes maior do que o lenho inicial.

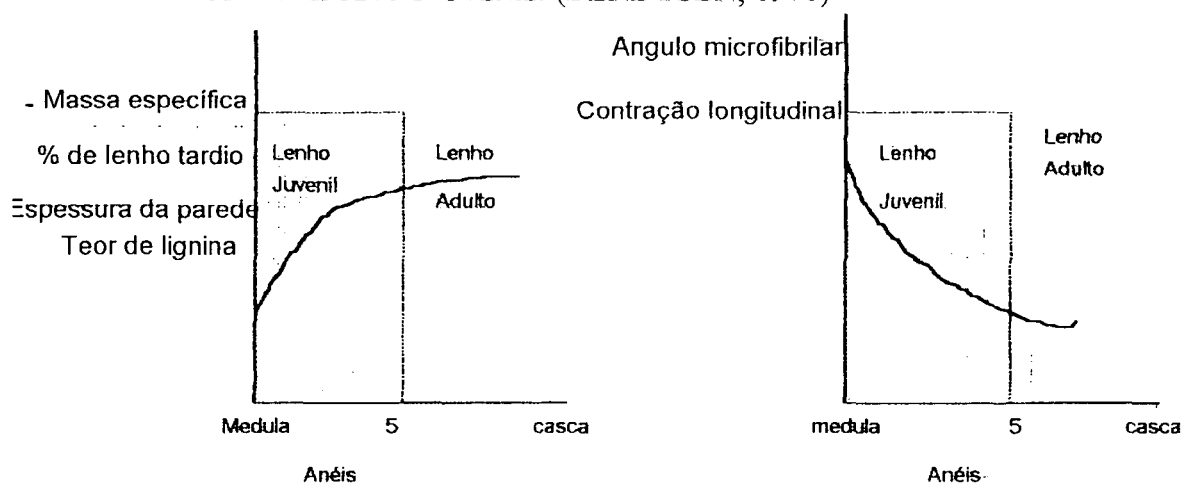
2.2.3 LENHO ADULTO E JUVENIL (IDADE DA MADEIRA).

Devido ao rápido crescimento, as espécies do gênero *Pinus* plantadas no sul do Brasil, atingem dimensões de comercialização ainda muito jovens. Segundo PEARSON & GILMORE

(1971), a madeira de árvores jovens possui maior percentagem de lenho juvenil que a madeira de árvores mais velhas. KLOCK (1989), observou a necessidade de se levar em conta a variação existente entre lenhos juvenil e adulto de *Pinus sp.*, para o cálculo das tensões admissíveis, visando a classificação da madeira em classes de qualidade.

Comparando com o lenho adulto, o lenho juvenil caracteriza-se por apresentar uma massa específica mais baixa, contração transversal menor, maior ângulo microfibrilar, maior contração longitudinal, menor teor de lignina, paredes celulares mais finas e menor percentagem de lenho tardio. Segundo BENDTSEN (1978), em anéis sucessivos a partir da medula, verifica-se o aumento da massa específica e propriedades correlatas. A taxa de mudança na maioria das propriedades é muito rápida nos primeiros anéis de crescimento e os anéis mais externos, vão assumindo, gradualmente, as características de madeira adulta (Figura 1).

FIGURA 1 - VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA, NA TRANSIÇÃO ENTRE LENHO ADULTO E JUVENIL. (BENDTSEN, 1978)

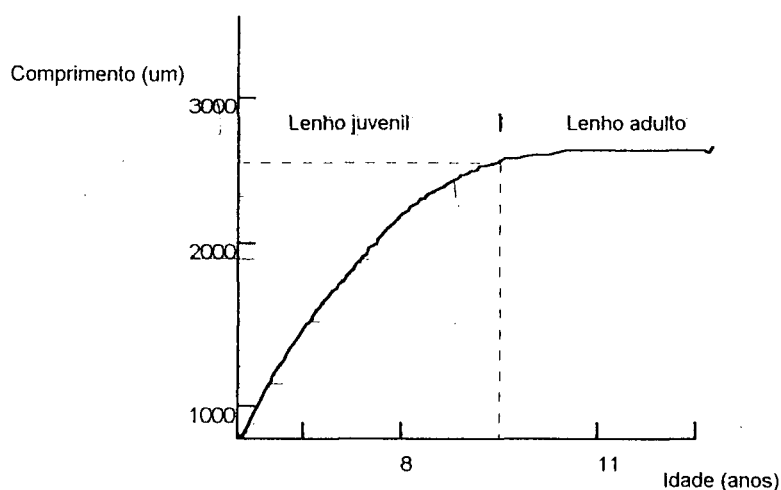


Peças estruturais que contêm uma determinada quantidade de lenho juvenil podem apresentar qualidades estruturais diferentes, sendo importante conhecer as diferenças entre lenho juvenil e adulto para melhor utilização da madeira.

Segundo BENDTSEN (1978), a massa específica do lenho juvenil de várias espécies do gênero *Pinus* é bastante baixa em relação ao lenho adulto, 0,36 g/cm³ e 0,68 g/cm³ para lenho juvenil e adulto de *Pinus* respectivamente. A proporção encontrada foi de 60% de lenho juvenil em árvores de 40 anos de idade. Segundo o autor, justifica-se um questionamento a respeito da aplicabilidade das tensões admissíveis até agora utilizadas para madeiras de florestas manejadas.

A demarcação entre lenho juvenil e adulto não é clara, devido a mudança gradual nas células. MENDONÇA (1982), encontrou a estabilização do comprimento dos traqueóides de *Pinus elliottii*, com 17 anos de idade, a partir do intervalo do 8º ao 11º anel (Figura 2). Esta estabilização, segundo ZOBEL (1959), é o resultado da redução da taxa de crescimento da árvore, caracterizado pela redução do ângulo microfibrilar.

FIGURA 2 - VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DAS CÉLULAS COM A IDADE DA ÁRVORE.



FONTE: MENDONÇA (1982).

Diferenças na resistência à flexão entre madeira juvenil e madeira adulta de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, com 18 anos de idade, foram encontradas por TOMASELLI (1979). A Tabela 1, apresenta os valores obtidos pelo autor, onde podem ser observadas diferenças, bem

como, a superioridade do lenho adulto para ambas as espécies. Da mesma forma, MUÑIZ (1993) demonstrou haver esta diferença (Tabela 2) para as mesmas espécies com 30 anos de idade, com valores superiores aos obtidos por TOMASELLI (1979), provavelmente em decorrência da maior idade da madeira estudada.

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS NOS LENHOS JUVENIL E ADULTO DE MADEIRAS DE *Pinus elliottii* E *Pinus taeda* COM 18 ANOS DE IDADE.

Propriedade	<i>Pinus elliottii</i>		<i>Pinus taeda</i>	
	Juvenil	Adulto	Juvenil	Adulto
Módulo de ruptura (kgf/cm ²)	512	989	497	1065
Tensão limite (kgf/cm ²)	259	557	232	590
Módulo de elasticidade (kgf/cm ²)	76100	163300	61200	153300

FONTE: (TOMASELLI, 1979).

TABELA 2 - VARIAÇÃO DE MOE, MOR E TENSÃO NO LIMITE DE PROPORCIONALIDADE COM O TIPO DE LENHO, PARA MADEIRA DE *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* L c/ 30 anos de idade.

Propriedade	<i>Pinus elliottii</i>		<i>Pinus taeda</i>	
	Juvenil	Adulto	Juvenil	Adulto
Módulo de ruptura (kgf/cm ²)	648,92	920,92	638,18	941,24
Tensão limite (kgf/cm ²)	332,1	481,65	335,50	482,88
Módulo de elasticidade (kgf/cm ²)	86309,5	161432	88333,3	160438,1

FONTE: (MUÑIZ, 1993).

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

2.3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Um dos principais objetivos da atividade florestal é a produção de madeira para diversos fins. A aptidão deste material para cada tipo de utilização é determinada por uma série de propriedades e características físicas e mecânicas.

Segundo NOAK (1976), o valor e a regularidade das propriedades mecânicas e físicas, são uma escala para julgamento da qualidade da madeira, e uma estimativa de seu poder de concorrência no mercado.

Embora a experiência de uso e a disponibilidade da madeira freqüentemente decidam quais as espécies a serem utilizadas para uma determinada finalidade, atualmente requer-se um conhecimento muito mais detalhado para uma utilização eficiente.

Como exemplos da necessidade de conhecermos o material a ser utilizado, podem-se citar a indústria de polpa e papel, interessada na massa específica, e comprimento de fibras ou traqueóides, a indústria moveleira, interessada na estabilidade dimensional, características de superfície, coloração, etc., e na utilização para fins estruturais, onde há interesse nas propriedades de resistência da madeira para os diversos tipos de esforços solicitantes, como compressão, tração, cisalhamento e especialmente flexão.

Segundo BENDTSEN (1978), o entendimento das características da madeira é essencial para seu uso eficiente. Desta forma, para se classificar a madeira em categorias de resistência, há necessidade de se conhecer as variáveis e de que forma elas influem na resistência.

2.3.2. ELASTICIDADE DA MADEIRA

Um corpo sólido é chamado elástico quando a deformação produzida devido à aplicação de uma carga, abaixo do limite de proporcionalidade, é completamente anulada após o relaxamento desta carga. Além do limite proporcional, as deformações plásticas sofridas pelo material são irreversíveis (PARKER, 1963, e KOLLMANN & COTÊ Jr., 1968).

Quando levemente carregada, por um curto período, a madeira deforma de acordo com a lei de Hooke, onde a deformação da madeira é proporcional ao esforço aplicado. Dentro deste intervalo, chamado elástico, a razão tensão/deformação é chamado de módulo de elasticidade (MOE).

O módulo de elasticidade (MOE), é um índice de rigidez da madeira, ou seja, uma medida de sua aptidão para resistir às deformações impostas por uma carga (WANGAARD, 1950). Em teste de flexão estática, com dois apoios e um ponto de aplicação de carga, pode ser obtido através da fórmula abaixo:

$$MOE = \frac{(P' \cdot L^k)}{(4 \cdot d \cdot b \cdot h^k)}$$

onde:

MOE = Módulo de elasticidade (kgf/cm²)

P' = Carga no limite de proporcionalidade (kgf);

L = Comprimento do vão (cm);

d = Deformação correspondente à carga no limite de proporcionalidade (cm);

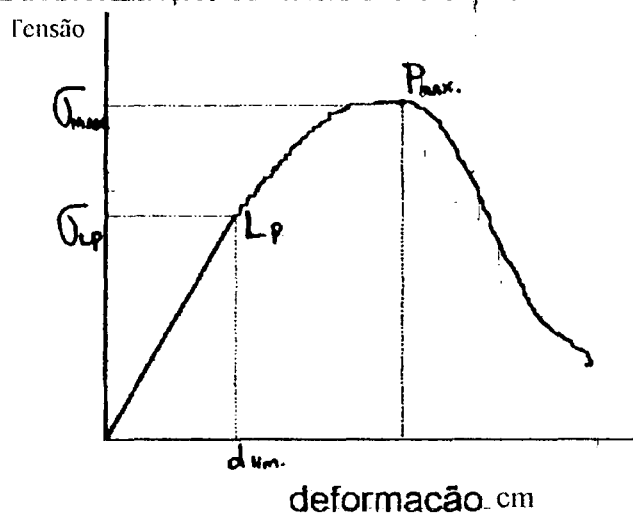
h = Altura da secção transversal do corpo de prova (cm);

b = Largura da seção transversal do corpo de prova (cm);

k = Constante igual a 3.

Na prática, o limite de proporcionalidade de um material é determinado pelo diagrama tensão/deformação. O ponto de inflexão da curva identifica o limite proporcional (WANGAARD, 1950), como mostra a Figura 3.

FIGURA 3 - DIAGRAMA DA RELAÇÃO TENSÃO/DEFORMAÇÃO



As tensões são comumente medidas em Pa (Pascal) ou kgf/cm^2 e a deformação é expressa em cm de deformação por cm de comprimento da peça.

O módulo de elasticidade (MOE) pode ser obtido tanto nos ensaios de flexão estática como nos de tração e compressão paralelas as fibras. Os valores de MOE encontrados para os dois últimos casos são relativamente próximos, enquanto nos testes de flexão estática os valores são um pouco menores que os resultados obtidos em ensaios de compressão paralela à Grã (KOLLMANN & COTÊ Jr. 1968), razão pela qual, constitui-se no método mais empregado para obtenção do módulo de elasticidade GEIGER¹ citado por (MUÑIZ, 1993).

¹GEIGER, K. Barusksichtigung der Schubverformung bei der Ermittlung des elastizitätsmodulus van Holz in statischen Biegeversuch. Holztechnologie. v.2, n.2, p.102-106. 1950.

A razão entre as tensões no limite proporcional e as tensões de ruptura, nos diversos ensaios, são importantes para determinação de coeficientes de redução, utilizados na avaliação da tensão admissível de peças estruturais (BAUER, 1985).

Na prática, o coeficiente utilizado para derivação da tensão admissível para peças estruturais de madeira sujeitas à flexão estática, é igual à 9/16 da tensão de ruptura (PFEIL, 1989).

2.3.3 RESISTÊNCIA DA MADEIRA

A resistência máxima de um material é definida como o esforço exercido até o momento da sua ruptura (BAUER, 1985 e KLOCK, 1989).

Alguns materiais possuem reservas consideráveis de resistência entre o limite elástico (ponto a partir do qual ocorrem deformações irreversíveis) e a resistência máxima; no entanto, essa faixa de resistência, chamada inelástica, não é considerada na aplicação da teoria de resistência para vigas de madeira, por ser muito variável com relação a outros materiais de construção, como o aço por exemplo.

Testes com corpos de prova de madeira da mesma espécie e dimensões, e nas mesmas condições de climatização, podem resultar em variação considerável nos valores de resistência. Esta variabilidade nos resultados dos testes, é levada em consideração quando se estabelece o esforço admissível para diferentes espécies e classes de qualidade de madeira para fins estruturais PARKER (1963).

Segundo WANGAARD (1950), a resistência à ruptura de uma viga de madeira é medida em termos de carga por unidade de área e é expressa através do módulo de ruptura.

Este valor, quando calculado através de teste de flexão estática, exprime o esforço máximo nas fibras superiores e inferiores da secção transversal da viga ou amostra. Os valores de ruptura são utilizados para determinação das tensões admissíveis, para os diversos tipos de esforços solicitantes.

Na obtenção do módulo de ruptura através de testes de flexão estática, para vigas ou amostras apoiadas livremente em dois pontos e com um ponto central de aplicação de carga, a fórmula utilizada é a seguinte:

$$MOR = \frac{1,5 \cdot P \cdot L}{b \cdot h^2}$$

onde:

MOR = Módulo de ruptura (kgf/cm²);

P = Carga máxima (kgf);

L = Comprimento do vão (cm);

b = Largura da secção transversal do Corpo de prova (cm);

h = Altura da secção transversal do corpo de prova (cm).

2.4 FATORES QUE INFLUEM NA RESISTÊNCIA

Segundo BAUER (1985) e PFEIL (1989) a escolha da madeira de uma espécie para um determinado emprego, deve ser feita com economia e segurança, com base nos valores médios que definem seu comportamento quanto às solicitações mecânicas. Esse conhecimento deve levar em consideração o resultado de ensaios representativos da madeira em questão, os

fatores naturais (características do material) e os fatores tecnológicos (técnicas de ensaio), a saber:

A - Fatores naturais: a) Estrutura anatômica da madeira; b) Massa específica do material; c) Localização da peça na tora; d) Presença de nós, grã irregular, fendas ou rachaduras e outros defeitos; e) Teor de umidade.

B - Fatores tecnológicos: a) Forma e dimensão dos corpos de prova; b) Orientação das solicitações em relação aos anéis de crescimento da madeira; c) Velocidade de aplicação das cargas.

Esses fatores dizem respeito à distribuição de tensões internas nas peças, sendo estes, variáveis conforme sua forma e dimensão, e as respostas anisotrópicas da madeira.

2.4.1 INFLUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA

O cálculo da massa específica é dado pela fórmula:

$$ME = m/v,$$

onde:

m = Massa do material (g);

v = Volume ocupado pela respectiva massa. (cm³).

Para VORREITER (1949), a massa específica pode ser determinada de diversas formas, e conseqüentemente identificada por diferentes denominações, devido a estrutura anatômica da madeira e a influência da umidade sobre a massa específica, a saber:

a) Massa específica real da madeira: é a relação entre a massa do material lenhoso (celulose + lignina + extrativos) e seu volume, sem considerar os espaços vazios. Seu valor é

aproximado para madeiras de todas as espécies, ou seja, em torno de $1,50 \text{ g/cm}^3$ (DESCH, 1982).

b) Massa específica aparente: determinada em diversos teores de umidade, é correspondente à razão entre o peso da madeira a um determinado teor de umidade e seu volume no mesmo teor de umidade.

c) Massa específica aparente básica: é dada pela razão entre a massa da madeira completamente seca, e o seu volume no estado de umidade saturado (acima do P.S.F.).

Em alguns casos, devido a dificuldade de medição do volume, em estudos comparativos costuma-se usar a massa específica aparente básica, pois permite a avaliação da massa e do volume numa condição sempre constante.

A massa específica é uma propriedade da madeira que representa a quantidade de massa lenhosa por unidade de volume do material, e está bem relacionada à sua resistência. HELLMEISTER (1973), qualifica a densidade como uma das propriedades mais significativas para caracterizar as madeiras destinadas à construção civil. BROWN *et alli* (1952), KOLLMANN & COTÊ Jr. (1968) e BAUER (1985), observaram que o módulo de ruptura, o módulo de elasticidade, a resistência a compressão paralela à grã e o cisalhamento da madeira são linearmente relacionados com a massa específica. KOCH (1972), desenvolveu regressões lineares relacionando cinco propriedades mecânicas de madeira verde, isenta de defeitos, com a massa específica. Os coeficientes de correlação (R) variaram de 0,38 a 0,87.

A relação entre resistência à tração e a massa específica não é clara, e os dados das pesquisas são limitados. KOLLMANN & COTÊ Jr. (1968), obtiveram uma correlação linear positiva entre a resistência à tração e a massa específica; os valores de R variaram de 0,33 a 0,8. KOCH (1972), mostrou que há uma relação entre resistência à tração e massa específica; seus dados para amostras isentas de defeitos mostraram uma relação linear ($R = 0,89$).

Segundo BAUER (1985), ensaios de qualificação, quanto a compressão em mais de 200 espécies lenhosas, realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, conduziram a seguinte fórmula de correlação:

$$\sigma = (663 D - 1,04);$$

onde: σ é a tensão de compressão da madeira em (kgf/cm²), e D a densidade da mesma expressa em g/cm³, a 15% de umidade.

O conhecimento da massa específica é considerada importante, pois permite tirar conclusões sobre adaptabilidade da madeira como material de construção para fins estruturais, devido à boa relação resistência/massa (TRENDELEMBURG e MAYER-WEGELIN¹ citados por KLOCK, 1989 e MUÑIZ, 1993).

BOLZA & KLOOT (1963) estudaram a relação do módulo de ruptura de *Pinus elliottii*, *Pinus radiata* e *Pinus palustris* com as respectivas massas específicas, e verificaram que a linearidade é bem estabelecida entre as duas variáveis.

TURNBULL (1941) estimou o módulo de ruptura a partir da massa específica da madeira de *Pinus sp.* Comparando a estimativa com os valores reais, o autor encontrou cerca de 2% de desvio da média.

Segundo MUÑIZ (1993), as propriedades de resistência têm seus valores aumentados com o incremento da massa específica, sendo que essa relação é mais acentuada para madeiras secas do que para madeiras verdes. Segundo a mesma autora, a massa específica é um excelente indicador das propriedades mecânicas, apenas para madeiras com grã direita e livre de defeitos, ou seja, sem a influência de outros fatores que alteram negativamente esta relação.

¹ TRENDELEMBURG, R e MAYER-WEGELIN, H. Das Holz als Rohstoff. München, Carl Hauser Verlag, 1955. 541p.

2.4.2 INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA.

2.4.2.1 Relação água-madeira.

A madeira, como material higroscópico, admite água líquida ou vapor d'água quando se encontra em ambientes onde a pressão de vapor é maior que a pressão de vapor d'água da própria madeira. Segundo BROWN *et alli* (1952) esse fenômeno, é denominado adsorção, quando a situação é inversa, o fenômeno é chamado desorção.

A característica higroscópica da madeira, de acordo com autores como KOLLMANN & COTÊ Jr. (1968), SIAU (1971) e SKAAR (1972), é função da capacidade que os sítios higroscópicos da parede celular têm de se ligar à moléculas de água, por meio de forças elétricas dipolares, chamadas pontes de hidrogênio.

A intensidade de troca de água da madeira com a atmosfera ambiente varia de acordo com a superfície de sorção exposta (adsorção ou desorção), com a pressão de vapor da água adsorvida, com a temperatura e com a composição química (BROWN *et alli* 1952; SIAU, 1971 e SKAAR, 1972).

A sorção é um fenômeno dependente da superfície. Segundo BROWN *et alli* (1952) e STAMM (1964), existem três classes de área envolvidas, ou seja, a área externa do material, a área superficial das cavidades celulares e a área superficial das fibrilas nas paredes celulares. Ao se compararem as três classes de áreas, evidencia-se a importância da área superficial das fibrilas pela grande dimensão que ocupa, implicando numa maior intensidade de sorção.

A água pode ser encontrada na madeira em três formas diferentes:

a) água livre ou capilar; b) água de impregnação; c) água de constituição.

A água livre ou capilar ocorre acima do ponto de saturação das fibras, ocupando as cavidades celulares e espaços intercelulares.

Embora a água livre tenha importância no aumento do peso da madeira, a retirada dessa água não implica em maiores efeitos na variação dimensional da madeira, nem tampouco em suas propriedades mecânicas (LIMA, 1983).

Num processo de secagem, a partir da madeira verde, a água mais facilmente retirada é a água capilar (STAMM, 1964).

Uma segunda forma de ocorrência de água na madeira é a adsorvida na parede celular, que é denominada de água de impregnação. A secagem abaixo do ponto de saturação das fibras remove essa água, causando modificação dimensional na madeira (SKAAR, 1972).

Unida à estrutura celulósica da madeira por forças covalentes em sua superfície, considera-se esse tipo de ocorrência de água como água de adsorção, como foi mencionado por KOLLMANN & COTÉ Jr. (1968).

Segundo estes mesmos autores, as microfibrilas formadoras das paredes celulares são formadas por regiões cristalinas e por regiões amorfas. A sorção química encontra primeiramente as regiões amorfas das microfibrilas de celulose, como os pontos favoráveis para iniciar-se, porque ali as cadeias celulósicas estão estendidas, havendo um maior número de pontes de hidrogênio que nas regiões cristalinas.

A sorção nas regiões amorfas quase não causa modificações no volume da madeira. Porém, considerando-se a simultaneidade de ocorrência dos dois fenômenos nas regiões amorfas e na superfície das regiões cristalinas, demonstra-se o fator responsável pela variação nas dimensões e nas propriedades mecânicas da madeira, uma vez que as maiores alterações físicas na madeira correspondem à adsorção ou desorção de água na superfície das regiões cristalinas da parede celular (SKAAR, 1972).

A água de constituição é a água mais firmemente aderida à madeira (STAMM, 1964). Ela não é realmente água até que o material celulósico seja aquecido em condições drásticas, onde degradações térmicas ocorrem, resultando na quebra de grupos hidroxílicos para formá-la.

A água de constituição participa da natureza orgânica da parede celular, porém, não desempenha papel importante na interrelação entre a substância madeira e a água de sorção. Assim podemos entender porque as propriedades mecânicas da madeira independem deste tipo de água (SIAU 1971).

2.4.2.2 Relações entre resistência da madeira e seu teor de umidade

Segundo WILSON (1932), o aumento na resistência da madeira, com o decréscimo no teor de umidade, pode ser considerado como um resultado, tanto do fortalecimento e rigidez dos elementos estruturais da madeira como da sua compactação, devido a contração que acompanha a perda de água.

WANGAARD (1950) também relaciona o aumento dos valores de resistência da madeira com a compactação dos elementos estruturais da parede celular. TIEMANN (1951), de outra forma, explica que, quando a água penetra entre as áreas cristalinas, há uma dilatação na peça, diminuindo a força de coesão entre elas e, conseqüentemente, os valores de várias propriedades mecânicas.

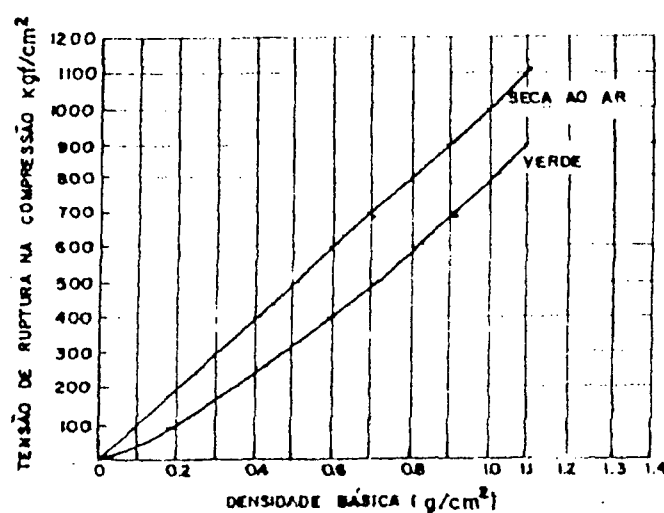
STAMM (1964), afirmou que quase todas as propriedades mecânicas da madeira têm seus valores aumentados com o decréscimo do teor de umidade, abaixo do ponto de saturação das fibras. Segundo ele, esse efeito é devido a contração da peça, pois ao se remover a

umidade, as unidades ultraestruturais da parede celular se aproximam, aumentando significativamente a quantidade de ligações por meio de pontes de hidrogênio.

Segundo KOCH (1972), a madeira tem sua resistência diminuída com o aumento do teor de umidade, e tem a resistência aumentada com a sua secagem à teores de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (P.S.F.), sendo que, acima deste ponto, a resistência permanece constante.

PIGOZZO (1983) também verificou haver um aumento de resistência com redução do teor de umidade. Uma peça de madeira na umidade de equilíbrio ao ar pode ser até duas vezes mais resistente em relação à mesma peça na condição verde (Figura 4). Esta relação pode variar com a espécie, com o gradiente de umidade e com a propriedade mecânica considerada.

FIGURA 4 - RESISTÊNCIA DA MADEIRA VERDE E DA MADEIRA SECA AO AR.



Entre os métodos existentes para representar a relação umidade-madeira, a níveis de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, o que tem merecido maior atenção, por apresentar maior exatidão, é o emprego de equações, quando comparado com os demais. Diversos modelos procuram representar esse efeito, no entanto, o mais utilizado é o modelo exponencial. De acordo com WILSON (1932), o emprego da equação exponencial é baseado

no fato que, para qualquer espécie e propriedade de resistência, os valores de teor de umidade dentro de certos limites, e o logaritmo dos valores de resistência correspondentes, têm encontrado semelhança com a relação linear.

A tentativa de encontrar uma equação que relacione várias propriedades mecânicas da madeira com seu teor de umidade, tem sido causa de diversos estudos. PEIRCE (1929), trabalhando com fibras têxteis, observou que a relação existente entre o módulo de rigidez e o teor de umidade, é semelhante à relação obtida para resistência da madeira numa classe de umidade fortemente aderida à celulose, denominando-a de água alfa, não sendo nada mais que água de impregnação. O autor elaborou a seguinte equação exponencial, capaz de representar várias propriedades de resistência:

$$R = R_0 \cdot e^{(-a \cdot U)}$$

onde:

R = Valor de resistência no teor de umidade U;

R₀ = Valor de R à 0% de umidade;

a = Constante obtida mediante testes mecânicos.

WILSON¹, citado por LIMA (1983) e TANAAMI (1986), descreveu a relação propriedade mecânica-umidade, utilizando a seguinte equação:

$$R = R_p \cdot 10^{K(U_p - U)}$$

onde:

R = Valor da propriedade mecânica no teor de umidade U;

K = Constante;

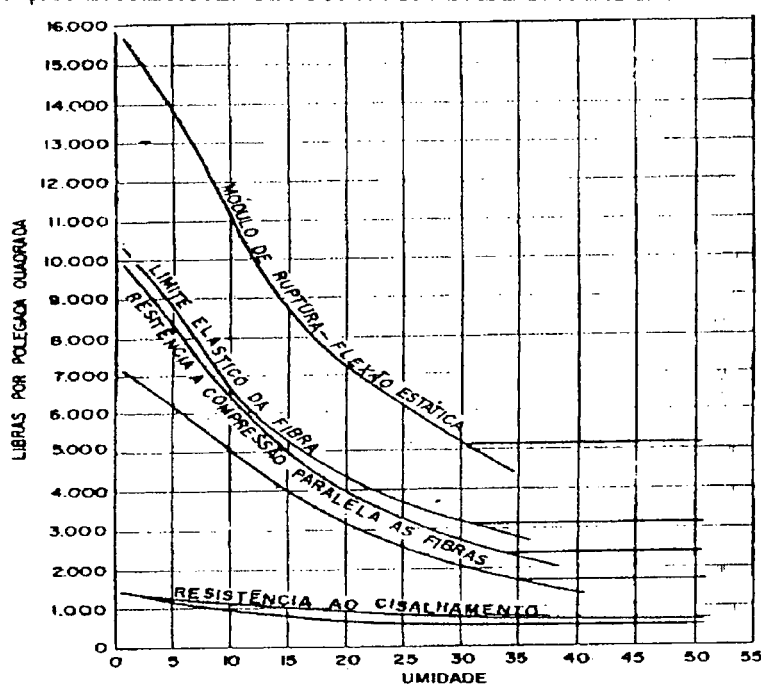
¹ WILSON, T. R. C. Strength-moisture relation for wood. Wasington, D.C., U.S.D.A. Technical bulletin, n.282, 1932. 88 p.

R_p = Resistência no ponto de interseção em que a curva exponencial, passa pela reta constante da propriedade no estado de umidade verde;

U_p = Teor de umidade correspondente à R_p .

O autor encontrou valores de resistência para flexão e módulo de elasticidade, resistência à compressão paralela e perpendicular à grã, e cisalhamento paralelo à grã (Figura 5).

FIGURA 5 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A UMIDADE DA MADEIRA



TIEMANN (1951) relacionou a resistência à compressão paralela às fibras, como variável dependente, com a densidade e o teor de umidade, como variáveis independentes, para a madeira de *Pinus palustris*. Posteriormente, este autor relacionou a resistência das madeiras de *Pinus palustris*, *Picea* e *Castanea*, como uma função exponencial apenas do teor de umidade.

GERHARDS (1982), mostrou a relação entre teor de umidade na faixa de 5% à 30% para várias espécies e propriedades mecânicas (compressão, tração, flexão e cisalhamento), por meio da seguinte equação:

$$R = a \cdot U^2 + b \cdot U + c$$

onde:

R = Propriedade mecânica;

U = Teor de umidade;

a, b, c = Valores constantes.

Como mencionado anteriormente, as várias propriedades mecânicas da madeira não são igualmente afetadas pela variação no teor de umidade. Enquanto algumas propriedades, como a resistência à flexão estática e à compressão aumentam grandemente com o decréscimo em umidade, outras, como a rigidez, variam moderadamente. No caso da resistência à flexão dinâmica, pode até mesmo acontecer um ligeiro decréscimo.

De acordo com o WOOD HANDBOOK (U.S.D.A., 1955), nota-se que, com uma variação relativa de 1% na umidade da madeira, obtém-se uma variação de 5% na tensão onde ocorre o limite de proporcionalidade, 4% no módulo de ruptura, 2% no módulo de elasticidade. Da mesma forma ocorre uma variação de 5% na tensão correspondente ao limite de proporcionalidade em compressão paralela, de 6% na tensão máxima no ensaio de compressão paralela e de 3% na resistência ao cisalhamento, entre outras.

Diversos trabalhos citam fórmulas logarítmicas como as mais exatas, com a finalidade de ajustar os valores de resistência para qualquer teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, para um valor padronizado à 12%. Entre elas encontra-se a equação apresentada no WOOD HANDBOOK (U.S.D.A., 1955), a seguir:

$$\text{Log } R_3 = \text{Log } R_1 - \frac{(U_1 - U_3)}{(U_1 - U_2)} \cdot \text{Log } \frac{R_2}{R_1}$$

onde:

R_1 = Resistência no teor de umidade U_1 ;

R_2 = Resistência no teor de umidade U_2 ;

R_3 = Resistência ajustada para o teor de umidade U_3 .

GERHARDS (1982), revisando a literatura, observou grande variação nos resultados de vários trabalhos e procurou sumarizar o efeito que o teor de umidade exerce nas diferentes propriedades mecânicas da madeira, buscando, dessa forma, tirar relações ajustáveis às condições ambientais de umidade relativa. Assim, concluiu que o efeito da umidade é menor sobre a resistência à tração paralela que sobre resistência à compressão paralela, enquanto o módulo de rigidez e resistência ao cisalhamento paralelo, mostraram comportamentos semelhantes entre si. O mesmo aconteceu entre a resistência à compressão perpendicular no limite de proporcionalidade e a resistência à flexão estática.

KOLLMANN & COTÊ Jr. (1968), discutindo trabalhos de diversos autores, procuraram mostrar o efeito que as variações do teor de umidade apresentam sobre as diferentes propriedades mecânicas. Encontraram para a tração paralela à grã, um ponto de máxima resistência, entre 8% e 10%, fato também observado para resistência ao cisalhamento na direção paralela à grã, mas com menor intensidade. Outras propriedades mecânicas foram discutidas pelos autores, não tendo diferenciado significativamente das mencionadas até aqui, salvo, talvez, no que se refere ao trabalho até a carga máxima em flexão estática, a qual foi pouco influenciada pela variação no teor de umidade da madeira.

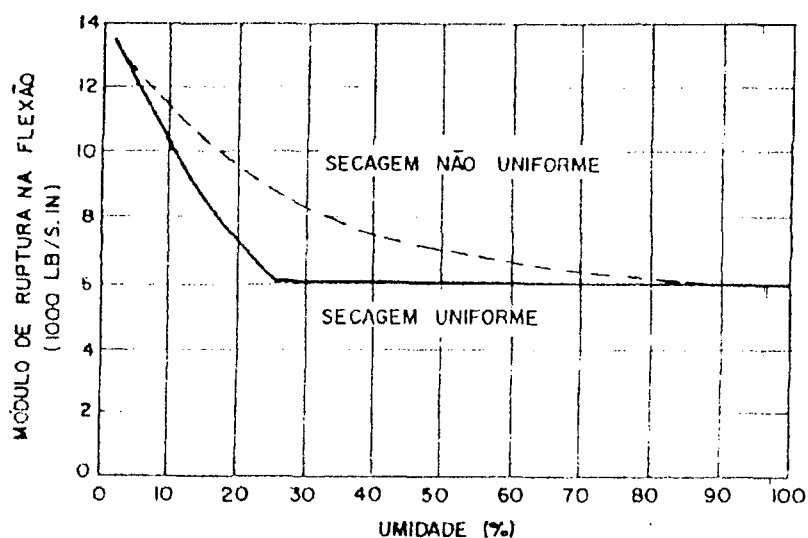
SCHINIEWIND (1962), pesquisando a resistência à tração normal de *Quercus kelloggii*, observou na faixa de 6% a 20% de umidade, melhor ajustamento dos dados à uma equação quadrática.

WILSON¹, citado por TANAAMI (1986), admitiu a importância da climatização no estudo da relação teor de umidade/resistência da madeira. Eles constataram uma ligeira variação na resistência em teores de umidade acima do P.S.F.. Essa variação foi atribuída à existência de um gradiente de umidade nos corpos de prova. Segundo estes autores, as curvas convencionais não evidenciam a variação na resistência da madeira quando a umidade é reduzida até o P.S.F.. Entretanto, este fato somente é observado em peças de madeira de pequenas dimensões, sem gradientes de umidade.

WILSON (1932) apresentou duas curvas relacionando a umidade e a resistência da madeira. Uma foi obtida a partir de resultados de ensaios com corpos de prova climatizados, ou seja, com umidade uniforme ao longo de sua secção transversal, e outra, a partir de resultados de ensaios de corpos de prova não climatizados, com variação de umidade na secção transversal (Figura 6).

¹ WILSON, T. R. C. Strength-moisture relation for wood. Wasington, D.C., U.S.D.A. Technical bulletin, n.282, 1932. 88 p.

FIGURA 6 - EFEITO DA CLIMATIZAÇÃO DA MADEIRA NA RELAÇÃO UMIDADE/ RESISTÊNCIA.



Segundo JOHNSON (1965), as relações entre a resistência e teor de umidade da madeira de *Douglas fir*, evidenciaram um acréscimo de 43% no módulo de ruptura e de 18% no módulo de elasticidade no ensaio de flexão estática, quando a madeira foi seca do estado verde até 12%. GERHARDS (1970) concluiu que a elasticidade aumentou 23%, e o módulo de ruptura em flexão estática 30%, com a mesma variação de umidade na madeira.

HOYLE (1972) afirmou que a umidade é, talvez, o fator ambiental que mais afeta a madeira, por ser este material altamente higroscópico, e que madeiras estruturais são comumente usadas nas construções com alto teor de umidade, pois nem sempre se dispõe de material com a umidade dentro das especificações. BENDTSEN (1978) descobriu um acréscimo na resistência, quando o teor de umidade passou dos níveis de madeira verde para umidade de equilíbrio (15%) da ordem de 75% para compressão paralela às fibras, 35% para flexão estática e 13% para o cisalhamento.

COVINGTON & FEWEL (1975) constataram que a variação da porcentagem de umidade na madeira, causa variação nas propriedades geométricas (momento de inércia) e na elasticidade.

PIGOZZO (1983), relacionando a resistência à compressão paralela com o teor de umidade e a densidade aparente da madeira, de *Araucária angustifolia*, obteve um coeficiente de determinação (R^2) de 0,974.

MENDES (1984), estudando a influência da umidade e da massa específica na resistência ao cisalhamento da mesma espécie, obteve um R^2 de 0,95.

MECLAIN *et alli* (1984), apresentaram resultados experimentais para avaliar o efeito do teor de umidade na flexão de peças com dimensões estruturais de *Pinus spp.* O incremento médio observado para o módulo de ruptura (MOR) foi de 11%, quando a madeira passou da condição verde para 20% de umidade; e 35% quando passou da condição verde para 10% de umidade. Para o módulo de elasticidade (MOE), os acréscimos médios foram de: 5%, de verde à 20% de umidade; 22%, de verde à 15% e 25%, de verde à 10%. Segundo estes autores, a redução do teor de umidade abaixo de 15% não é justificada, pois o ganho de resistência nesse caso seria insignificante.

TANAAMI (1986) apresenta os resultados do ajuste feito para relacionar teor de umidade e densidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm e sua resistência à flexão, com um R^2 de 0,90.

Segundo esta autora, há um evidente aumento do módulo de elasticidade com a diminuição do teor de umidade na madeira, para níveis inferiores ao P.S.F., até a umidade de equilíbrio. Abaixo deste ponto, o MOE parece não ser influenciado pela redução do teor de umidade.

2.4.2.3 Coeficiente de influência do teor de umidade

A curva descrita pela tensão limite de resistência à flexão e o teor de umidade da madeira, conduz a um fator ou coeficiente de correção praticamente igual à metade do obtido para compressão. Este fator permite referir-se às resistências obtidas de madeiras secas ao ar livre, para qualquer teor de umidade de equilíbrio. O referido fator é conhecido como coeficiente de influência da umidade, HELLMEISTER (1973) e BAUER (1985). Segundo estes mesmos autores, a fórmula de correção dos valores obtidos na madeira seca ao ar é:

$$\sigma_{12\%} = \sigma (h-12)$$

Onde:

$\sigma_{12\%}$ = Resistência da madeira no teor de umidade à 12%;

σ = Resistência da madeira (kgf/cm²);

h = Teor de umidade em % da massa da madeira seca.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Testes com pequenas amostras de madeira foram realizados com a finalidade de obter dados para comparação das propriedades mecânicas. Estas propriedades, em conjunto com resultados de ensaios não destrutivos, forneceram a base para fixação da resistência e da rigidez da madeira, e suas variações com os seus respectivos teores de umidade e massas específicas aparentes.

Além da avaliação da influência do teor de umidade e da massa específica aparente sobre as propriedades mecânicas, foi estudada também, a relação entre as propriedades mecânicas e algumas características visuais da madeira, ou seja, o número médio de anéis de crescimento, a porcentagem média de lenho tardio e a largura média dos anéis de crescimento. Determinou-se, também, a razão entre a tensão no limite de proporcionalidade e o módulo de ruptura no ensaio de flexão estática, com a finalidade de avaliar a variação desta razão com o teor de umidade.

3.2 COLETA E PREPARO DO MATERIAL

Os trabalhos de coleta de material seguiram métodos de amostragem, tentando cobrir a distribuição das espécies em estudo na fazenda da empresa Forex Importadora e Exportadora de Madeiras S. A., localizada no município de Três Barras, Estado de Santa Catarina. Isto foi

efetuado pelo fato de que a madeira, sendo produto heterogêneo, mostra ampla variação de suas propriedades, entre e dentro de indivíduos da mesma espécie.

O material para o estudo foi obtido de 20 árvores selecionadas para corte, sendo 10 de *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm. e 10 de *Pinus taeda* L., provenientes de plantios com 21 anos de idade.

A variedade de cada espécie dos *Pinus*, supracitados, foi determinada após a coleta e preparo de material botânico, pelo Laboratório de Dendrologia do Curso de Engenharia Florestal, e se encontra registrada no Herbário deste laboratório sob os números 4526 e 4527.

A seleção das árvores para o estudo, dentro de cada talhão, obedeceu à critérios previamente estabelecidos quanto a classe diamétrica e o aspecto visual do fuste. Para o diâmetro a altura do peito (D.A.P.), definiu-se o diâmetro de 45 ± 3 cm como amostras médias de cada povoamento para, assim, evitar variações acentuadas devido às diferentes taxas de crescimento das árvores. Quanto a forma do fuste, selecionaram-se árvores com troncos cilíndricos, retos, sem bifurcações ou defeitos, para evitar a excessiva presença de lenho de reação e defeitos que pudessem influir nos resultados.

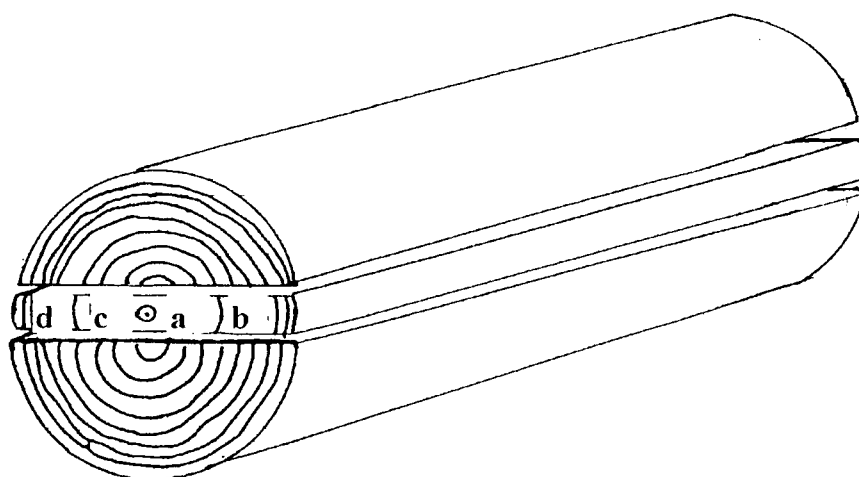
O material selecionado representou a altura comercialmente utilizada para obtenção de peças estruturais, ou seja, a primeira tora com 4 metros de comprimento a partir da base, evitando, assim, grandes variações ao longo da tora e a presença excessiva de lenho juvenil.

De cada tora foram obtidos dois toretes de 2 metros de comprimento. O número da árvore e a designação de cada torete, foram marcados na seção transversal.

Efetuada a coleta dos toretes, estes foram desdobrados, obtendo-se de cada um, pranchões com 7 cm de espessura, incluindo a medula na direção radial, como mostra a Figura 7.

O desdobro para a retirada dos pranchões foi feito com o auxílio de serra-fita, com posterior aplicação de solução a base de pentaclorofenato de sódio para prevenir o desenvolvimento de fungos. Os pranchões foram, então, transportados para o Laboratório de Tecnologia da Madeira, do Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais da Universidade Federal do Paraná (U.F.P.R.), empilhados livres do contato com o solo e cobertos com lona plástica para proteje-los da ventilação, marcados no topo e serrados em vigotes de 7 x 7 cm de secção transversal para confecção dos corpos de prova, acondicionamento e execução dos ensaios. Os vigotes foram classificados segundo a idade da madeira, como “a” e “c” para o lenho juvenil e “b” e “d” para lenho adulto, como mostra a Figura 7.

FIGURA 7 - ESQUEMA UTILIZADO PARA CLASSIFICAÇÃO DOS VIGOTES.

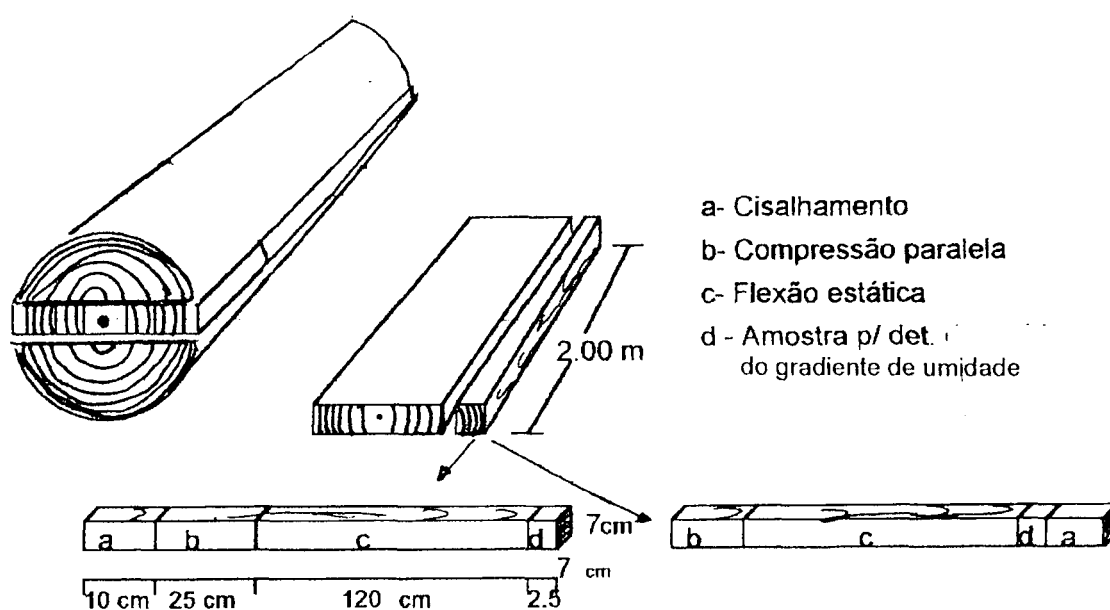


O objetivo dessa classificação foi reduzir o efeito do fator de variação sobre as propriedades a serem estudadas. Foram consideradas de lenho juvenil às peças obtidas até o 8º anel de crescimento, e de lenho adulto, às obtidas a partir deste ponto em direção a casca, conforme classificação sugerida por MENDONÇA (1982).

3.3 ALEATORIZAÇÃO E OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

Os corpos de prova foram obtidos em posições aleatórias dos vigotes, para evitar a sistematização e a obtenção de corpos de prova na mesma posição na tora, como mostra a Figura 8. Metade dessas peças forneceram material para testes com madeira de lenho juvenil, e a outra metade com madeira de lenho adulto.

FIGURA 8 - ESQUEMA DE RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA.



Após confeccionados, os corpos de prova foram condicionados em câmara climatizada à 20°C e 65% de umidade relativa, até atingir a umidade de equilíbrio com o meio ambiente.

3.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

3.4.1 TEOR DE UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE

A massa específica aparente e o teor de umidade da madeira foram determinados nos próprios corpos de prova testados nos ensaios mecânicos.

A massa específica aparente foi determinada pelo método estequiométrico. O volume foi obtido com o auxílio de um micrômetro da marca Palmer com precisão de 0,01 mm e um paquímetro da marca Mitutoyo, com precisão de 0,1 mm. A determinação da massa foi feita por pesagem, em balança com precisão de 0,01 g.

Para avaliação do teor de umidade utilizou-se a razão da diferença de massa entre os teores de umidade inicial e final, (massa da água), pela massa da madeira seca em estufa, como mostra a equação abaixo:

$$U\% = (P_u - P_o)/P_o,$$

onde:

$U\%$ = Teor de umidade, em % do peso da madeira no estado seco;

P_o = Massa da amostra seca em estufa em g;

P_u = Massa da amostra no teor de umidade no momento do ensaio em g.

A pesagem dos corpos de prova se deu no momento do ensaio e depois dos ensaios, após secagem em estufa à 103 ± 2 °C, até observação de massa constante.

O controle da umidade foi feito através de monitoramento da massa dos corpos de prova durante o processo de secagem, efetuado em dois estágios distintos.

No primeiro estágio os corpos de prova saturados, tiveram os topos selados com cola de poliestireno expandido, para evitar a formação de gradiente de umidade longitudinal. Posteriormente, eles foram condicionados em ambiente climatizado com temperatura e umidade do ar controlados para evitar a formação de gradientes de umidades acentuados.

No segundo estágio, quando foi atingida a umidade de equilíbrio da madeira, em cerca de 15%, os corpos de prova foram secos em estufa, com temperatura de $35^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

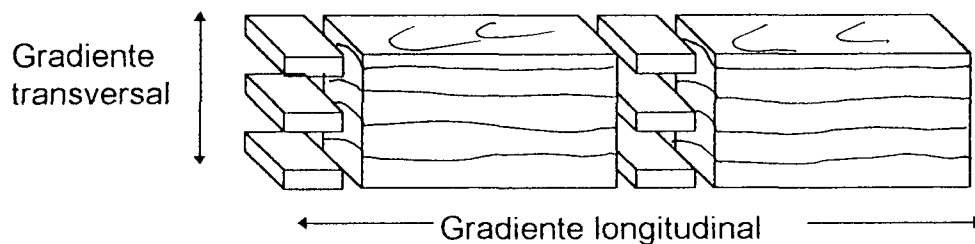
Com o objetivo de obter teores de umidade abaixo da umidade de equilíbrio de 15% e reduzir os gradientes de umidade e de temperatura da madeira, os corpos de prova foram retirados da estufa a medida em que secavam, em intervalos freqüentes, e acondicionados em dessecador. Posteriormente eles foram pesados, medidos e testados.

3.4.2 AVALIAÇÃO DO GRADIENTE DE UMIDADE

A avaliação do gradiente de umidade foi realizada a partir de 6 (seis) subamostras retiradas das porções internas e periféricas de 15 (quinze) amostras, como mostra a Figura 9. Foram utilizadas três repetições para avaliação do gradiente longitudinal e duas repetições para o transversal por corpo de prova.

As subamostras, com dimensões de 1 cm x 2 cm x 5 cm, foram secas em estufa à $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, até a massa constante. A partir do método gravimétrico, foi determinado o teor de umidade e a sua variação com o comprimento e a espessura dos corpos de prova.

FIGURA 9 - ESQUEMA DE RETIRADA DE SUBAMOSTRAS PARA AVALIAÇÃO DO GRADIENTE DE UMIDADE.



3.5 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS VISUAIS.

3.5.1 PORCENTAGEM MÉDIA DE LENHO TARDIO

A porcentagem de lenho tardio foi determinada em todos os corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos, procedendo-se a demarcação dos lenhos tardio e inicial dentro de cada anel de crescimento, utilizando-se de lupa quando necessário.

Para determinação das proporções dos diferentes lenhos, mediu-se com uma escala graduada, as dimensões das faces transversais de cada corpo de prova, perpendicularmente aos anéis de crescimento. O procedimento foi realizado nas duas faces transversais, obtendo-se uma média para cada corpo de prova.

Em seguida, foram medidas as faixas correspondentes ao lenho tardio, somando-as, e relacionando-as à dimensão da face transversal na direção radial.

A seguinte relação foi utilizada para o cálculo da porcentagem de lenho tardio:

$$\%L_T = (D/D_T) \times 100,$$

onde:

$\%L_T$ = Porcentagem de lenho tardio;

D = Somatório das faixas de lenho tardio (mm);

D_T = Dimensão média da secção transversal do corpo de prova na direção radial (mm).

3.5.2 LARGURA MÉDIA DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO

A largura média dos anéis de crescimento foi determinada pela razão entre o somatório das larguras dos anéis de crescimento, medidas com auxílio de paquímetro, e o número de anéis de crescimento tomados, nas duas faces transversais de cada corpo de prova.

3.5.3 NÚMERO MÉDIO DE ANÉIS DE CRESCIMENTO

Foi determinado por simples contagem, o número de anéis de crescimento nas faces transversais de cada corpo de prova. O número médio de anéis de crescimento, foi obtido considerando-se o valor médio das faces transversais.

3.6 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para a determinação das propriedades mecânicas, foi utilizada uma máquina de ensaio tipo universal, marca Tinus Olsen, com acessórios para os diferentes tipos de testes, como: suportes, deflectômetros e equipamento auxiliar para medição automática de deformação e carga, e confecção de gráficos. Todos os dados obtidos foram anotados em formulário específico, apresentado no Anexo 1.

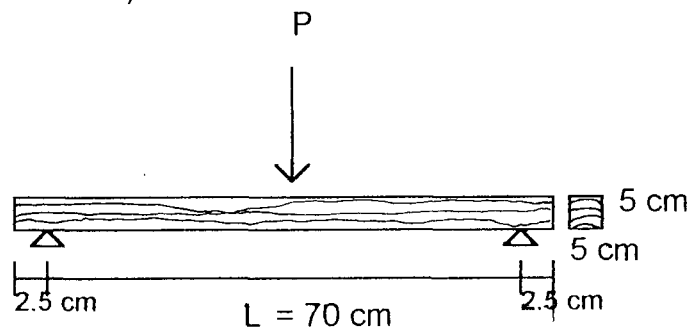
Antes dos ensaios, foram registradas as características visuais dos corpos de prova, ou seja, o número e a largura dos anéis de crescimento por cm na direção do raio, porcentagem de lenho tardio, além das dimensões e do peso de cada um. Posteriormente, foram calculados o teor de umidade, a massa específica aparente e a área sujeita ao esforço.

3.6.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA

O ensaio de flexão estática consistiu em submeter os corpos de prova da uma carga central, até a ruptura. Os corpos de prova foram livremente apoiados, com a carga, aplicada por meio de um cutelo central na face tangencial, no centro do vão (Figura 10). A velocidade de carga utilizada foi de 2,5 cm/ minuto.

Durante o ensaio foram registradas a deformação e a carga correspondente, para subsequente confecção dos gráficos.

FIGURA 10 - ESQUEMA DE CARREGAMENTO NO TESTE DE FLEXÃO ESTÁTICA.
(ASTM-D143)



A resistência à flexão foi determinada pelas seguintes fórmulas:

$$\text{MOR} = \frac{3 P L}{2 b h^2}$$

$$\text{MOE} = \frac{P L^3}{4 d b h^3}$$

$$T_{lp} = \frac{3 P_1 L}{2 b h^2}$$

onde:

MOR = Módulo de ruptura (kgf/cm²);

MOE = Módulo de elasticidade (kgf/cm²);

T_{lp} = Tensão no limite de proporcionalidade (kgf/cm²);

P = Carga máxima, antes da ruptura (kgf);

P_1 = Carga no limite de proporcionalidade (kgf);

L = Comprimento do vão entre apoios (m);

d = Deformação correspondente à carga no limite de proporcionalidade (cm);

b = Largura da seção transversal do corpo de prova (cm);

h = Altura da seção transversal do corpo de prova (cm).

3.6.1.1 Variação do limite elástico com o teor de umidade da madeira.

Para utilização em cálculos e projetos estruturais, os resultados dos ensaios são corrigidos por coeficientes de redução e coeficientes de segurança, um deles é o fator devido à duração da carga.

Quando a madeira é carregada por um curto período, ela se deforma até um limite, chamado de limite elástico. Acima do limite elástico, ocorrem deformações plásticas até a ruptura. Abaixo do limite elástico, as deformações são proporcionais às cargas aplicadas (KOLLMANN e COTÊ Jr., 1968).

As cargas permanentes devem ser mantidas dentro do limite elástico, pois as solicitações dentro deste limite independem da duração da carga.

O fator de correção, para satisfazer esta condição, é a razão T_{lim}/T_{rup} , onde T_{lim} é a tensão no limite elástico e T_{rup} é a tensão de ruptura. Segundo BAUER (1985), este fator, para o ensaio de flexão estática, é igual a 9/16.

A variação do limite elástico com o teor de umidade na madeira foi estudada, observando-se a razão entre a tensão no limite de proporcionalidade e a tensão de ruptura. Os valores resultantes dessa relação foram relacionados com os respectivos teores de umidade para a madeira das duas espécies e, através de teste de “t de Student”, comparados com o valor 9/16, utilizado na prática.

3.6.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA À GRÃ

Os corpos de prova, livres de defeitos, foram cuidadosamente cortados e aplainados nas dimensões iniciais de 5 x 5 x 20 cm, com as faces (tangencial, radial e transversal) paralelas umas às outras, e orientadas em relação aos anéis de crescimento (Figura 11).

Para uniformizar a distribuição da carga sobre o corpo de prova, foi utilizado uma placa de aço sobre o seu topo.

As deformações e cargas correspondentes foram registradas por instrumentos, até a carga máxima. A carga foi aplicada continuamente, a uma velocidade de avanço de 0,3 cm por minuto; posteriormente os valores de carga e deformação foram relacionados para a determinação do módulo de elasticidade.

O módulo de ruptura foi calculado através da seguinte equação:

$$MOR = P/A,$$

onde:

MOR = Módulo de ruptura à compressão, (kgf/cm²)

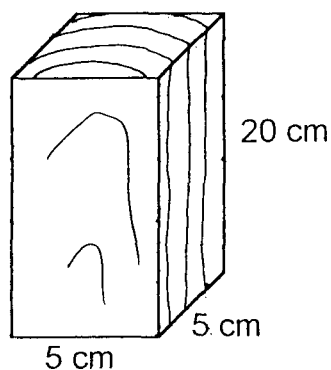
P = Carga máxima (kgf);

A = Área da secção transversal (cm²).

O módulo de elasticidade, no ensaio de compressão, foi calculado pela relação entre a tensão no limite de proporcionalidade, σ_{lim} , e a deformação unitária correspondente ϵ , ou seja:

$$MOE = \sigma_{lim} / \epsilon$$

FIGURA 11 - CORPO DE PROVA PARA O TESTE DE COMPRESSÃO PARALELA À GRÃ.
(ASTM-D143)



Da mesma forma que para o teste de flexão estática, foram determinados o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura nos diversos teores de umidade.

3.6.3

3.6.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

O ensaio de cisalhamento paralelo à grã foi realizado com auxílio de máquina universal de testes, e aparatos, em corpos de prova com dimensões iniciais de 5 x 5 x 6,5 cm, e um corte em “L” de 1,9 x 1,5 x 5 cm, como mostra a Figura 12.

Para sua confecção, utilizou-se madeira livre de defeitos, orientada tangencialmente e radialmente.

Na execução do ensaio a carga foi aplicada de modo a cisalhar a secção de 5 x 5 cm, nas faces tangenciais aos anéis de crescimento ou perpendicularmente a esse sentido. A velocidade de carga foi a mesma utilizada no teste de compressão paralela a grã, ou seja, 3 mm por minuto.

Com a avaliação da carga de ruptura, a tensão (τ) de cisalhamento foi calculada pela seguinte equação:

$$\tau = P/A,$$

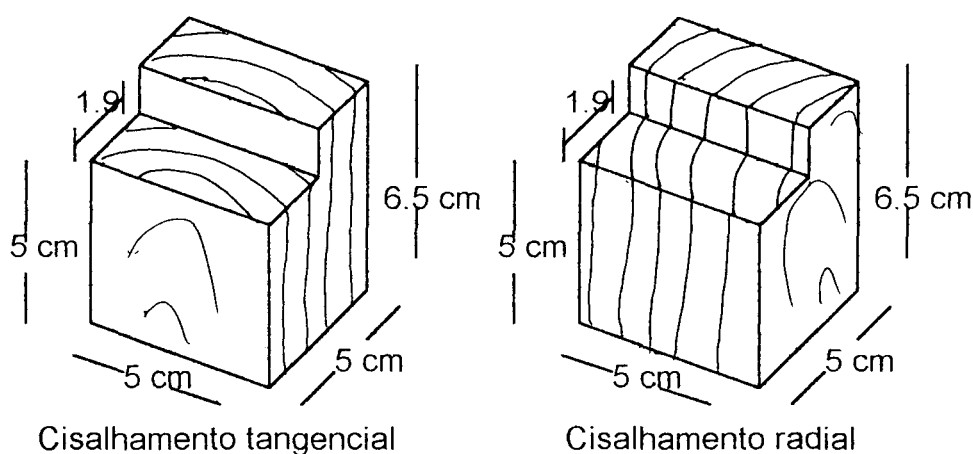
onde:

τ = Tensão de cisalhamento (kgf/cm²);

P = Carga de ruptura (kgf);

A = Área de cisalhamento (cm²).

FIGURA 12 - CORPO DE PROVA PARA O TESTE DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.
(SEGUNDO A NORMA ASTM -D143).



3.6.4 AVALIAÇÃO DA RIGIDEZ POR ENSAIO NÃO DESTRUTIVO

A avaliação da rigidez, foi feita por ensaios não destrutivos em máquina de classificação tipo POLAK, modelo TRU - MK3, com capacidade de 160 Kpa.

O material utilizado para este tipo de teste, consistiu de vigas com dimensões iniciais de 5 x 5 x 120 cm.

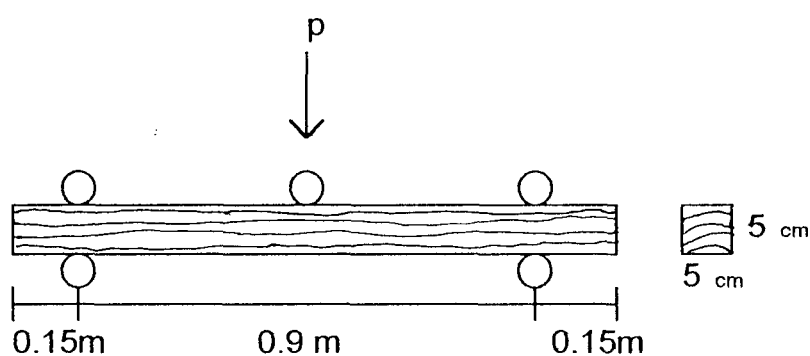
Para realização deste ensaio, foi determinado o valor aproximado da carga constante, a ser aplicada na viga pela máquina de classificação, abaixo do limite de proporcionalidade, com base nos valores obtidos para amostras livres de defeitos. Esta medida foi adotada para que não se ultrapassasse o limite proporcional da relação carga/deformação, limitando a carga aplicada dentro da faixa elástica da madeira.

A carga constante (P), de 180 kgf, foi aplicada no ponto central da viga, dentro do vão utilizado para obtenção do MOE (90 cm), conforme a Figura 13.

A deformação observada no decorrer do ensaio, foi correlacionada com o teor de umidade e a massa específica aparente correspondente, para avaliação da influência de cada uma destas características sobre a rigidez da madeira.

O módulo de elasticidade, obtido no ensaio não destrutivo, foi comparado com o obtido no ensaio de flexão estática, para avaliar a utilização e a precisão do primeiro método como indicador da rigidez da madeira.

FIGURA 13 - ESQUEMA DE CARREGAMENTO EM MÁQUINA DE TESTES NÃO DESTRUTIVOS.



3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O objetivo da análise estatística foi determinar estimativas dos parâmetros de resistência e rigidez, em função do teor de umidade e da massa específica aparente, e correlacionar as características visuais às propriedades mecânicas da madeira das duas espécies.

Os cálculos estatísticos dos resultados das propriedades estudadas, foram desenvolvidos para cada uma das espécies, e para o conjunto das mesmas. Foram determinadas, inicialmente, a média (\bar{X}), o coeficiente de variação (C.V.), e o intervalo de confiança (I.C.), com a probabilidade dos resultados serem verdadeiros de 95%.

Realizou-se o teste de homogeneidade de variância, para verificar a aplicabilidade da análise de variância aos dados observados, e o cálculo de correlação entre as características visuais e às propriedades mecânicas com a finalidade de identificar o grau de afinidade entre elas, para o uso como indicador da qualidade da madeira das duas espécies.

Foram efetuadas também, análises de regressão múltipla, tendo como variáveis dependentes a resistência máxima (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE), e como variáveis independentes o teor de umidade em porcentagem do peso da madeira seca (U%) e a massa específica aparente (γ).

Os modelos de equações de regressão utilizados para o ajuste das curvas, para relações entre a variável dependente e as variáveis independentes foram:

$$y = b_0 + b_1\gamma + b_2U$$

$$y = b_0 + b_1\gamma + \frac{b_2}{U}$$

$$\ln y = b_0 + \ln \gamma + b_1 U$$

$$y = b_0 + b_1 \gamma + b_2 U + b_3 U^2$$

$$\log y = b_0 + b_1 \gamma + b_2 U + b_3 U^2$$

$$\ln y = b_0 + b_1 U + b_2 \gamma$$

sendo:

y = Propriedade mecânica;

γ = Massa específica aparente (g/cm³);

U = Teor de umidade em percentagem do peso da madeira seca.

Foram determinadas as correlações entre as propriedades mecânicas, o teor de umidade e a massa específica aparente, para discriminação dos pesos das variáveis independentes no modelo matemático.

O objetivo final de testar vários modelos de regressão, foi obter um modelo que apresentasse condições de explicar as propriedades estudadas, com pequena possibilidade de erro.

O erro padrão da estimativa foi escolhido como critério de seleção dos modelos por ele representar o desvio médio dos valores estimados pelo modelo matemático, em relação aos valores observados. Este valor é a tradução numérica dos resíduos gerados pela regressão, portanto, quanto menor for o erro padrão da estimativa, maior é a acuracidade do modelo matemático obtido a partir da regressão.

Efetuuou-se ainda, a análise dos resíduos, gerados pelo modelo matemático, para mostrar graficamente a diferença entre os valores estimados e os valores observados, em todo

o intervalo de validade do modelo. Nele, pode ser observado se o modelo apresentou alguma tendenciosidade, e para quais intervalos o modelo apresentou maior precisão na estimativa.

Calculou-se o coeficiente de determinação, R^2 , para representar o grau de afinidade entre as variáveis do modelo, como mais indicado para dados em que há variação aritmética. Para dados em que a tendência não é linear, sendo o mais indicado para seleção do modelo a análise de resíduos e do erro padrão da estimativa, pois eles não são afetados pelo número de parâmetros do modelo.

Para a geração e análise dos modelos, foram utilizados os programas “Estatística” e “Statgraphics 7”.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 GRADIENTE DE UMIDADE NOS CORPOS DE PROVA

O perfeito condicionamento da madeira é fundamental para avaliações de resultados neste tipo de estudo. Por isso, inicialmente foi avaliada a distribuição da umidade nos corpos de prova. Essa análise foi importante, para assegurar a inexistência de um gradiente de umidade acentuado, possibilitando considerar válido o teor de umidade avaliado pelo método gravimétrico.

Os resultados da avaliação do gradiente de umidade nos corpos de prova, Tabelas 3 e 4, mostram que o condicionamento efetuado foi satisfatório, com valores baixos, em cerca de 0,5% de diferença entre teores de umidade no interior e na superfície da madeira, seguindo a condição de climatização da madeira sugerida por WILSON (1932).

TABELA 3 - VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE COM O COMPRIMENTO DOS CORPOS DE PROVA PARA AS DUAS ESPÉCIES TESTADAS.

Localização	Teor de umidade médio (%)	Coefficiente de variação(%)	Número de amostras testadas
Extremidades	17,54	2,67	15
Metade do comprimento	17,42	2,09	15

TABELA 4 - VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE COM A ESPESSURA DOS CORPOS DE PROVA PARA AS DUAS ESPÉCIES TESTADAS.

Localização	Teor de umidade médio (%)	Coefficiente de variação (%)	Número de amostras testadas
Na periferia da peça	17,4	3,10	20
No centro da peça	17,9	3,57	10

4.2 VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS COM O TEOR DE UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE.

4.2.1 FLEXÃO ESTÁTICA

A variação das propriedades mecânicas com o teor de umidade da madeira e sua massa específica aparente, foi estimada isoladamente para cada espécie estudada, e para ambas as espécies.

Na Figura 14, estão ilustradas as tendências de variações do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade (MOE) com variações no teor de umidade. Na Figura 15, estão ilustradas as tendências de variação do MOR e do MOE com a massa específica aparente para ambas as espécies.

Pode ser observado que o MOR apresentou uma tendência de variação linear crescente com a massa específica aparente. Esta tendência é semelhante à obtida por BOLZA e KLOOT (1963), KOCH (1972), e por HELLMEISTER (1973) quando estudaram a variação das propriedades mecânicas com a massa específica. A relação do MOR com o teor de umidade da madeira apresentou uma tendência não linear decrescente. A mesma tendência foi observada por WILSON (1932), LIMA (1983) e TANAAMI (1986).

O módulo de elasticidade apresentou o mesmo comportamento, porém, menos evidente.

FIGURA 14 - TENDÊNCIAS DE VARIAÇÃO DO MOR E DO MOE COM A UMIDADE DA MADEIRA.

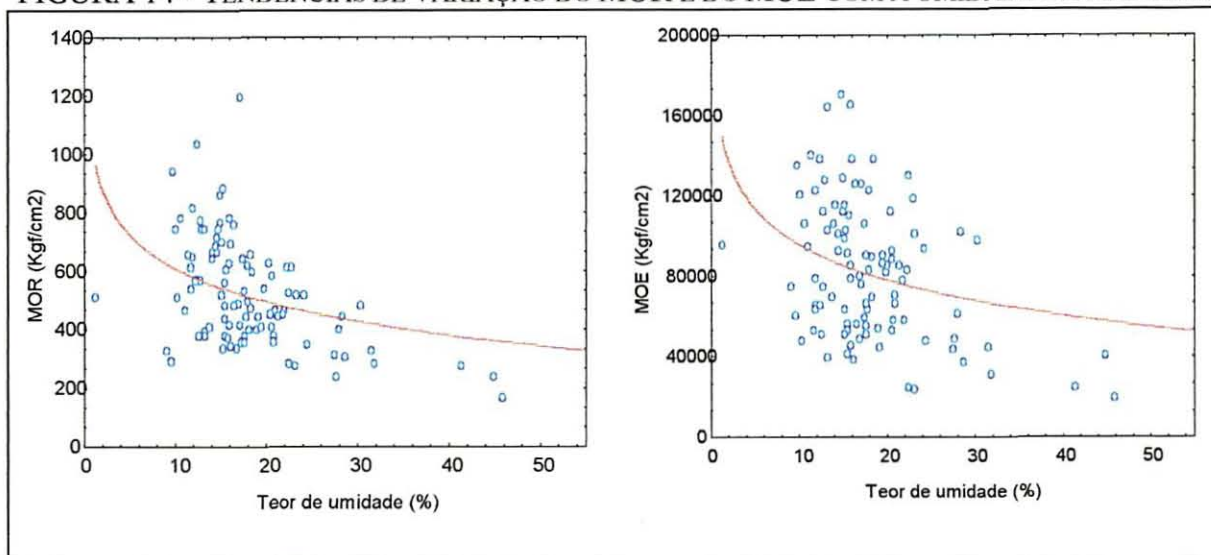
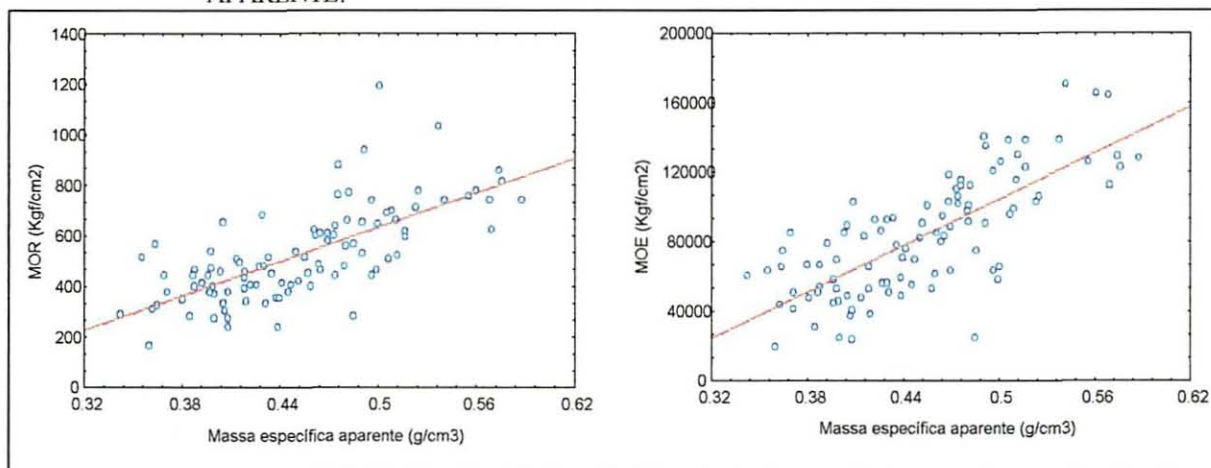


FIGURA 15- TENDÊNCIAS DE VARIAÇÃO DO MOR E DO MOE COM A MASSA ESPECÍFICA APARENTE.



A Tabela 5, mostra a baixa correlação entre o teor de umidade e o módulo de elasticidade, também verificada nos estudos desenvolvidos por KOLLMANN e COTÊ Jr. (1968) e TANAAMI (1986).

A massa específica aparente apresentou melhor correlação com o MOE e com o MOR para as duas espécies, indicando que esta característica física é mais importante que o teor de umidade, para estimar a resistência à flexão estática da madeira. Este resultado é semelhante ao obtido por HELLMEISTER (1973), estudando as variações das propriedades mecânicas com a massa específica e o teor de umidade para madeira de várias espécies. Isto sugere que, antes de classificar a madeira pelo seu teor de umidade, deve ser feita a classificação de acordo com a sua massa específica aparente.

TABELA 5 - VALORES DE CORRELAÇÃO (R) ENTRE O MOR E MOE DO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA COM AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA MADEIRA.

Espécie	Propriedade	Teor de umidade	Massa específica aparente
<i>P. taeda</i>	MOR	-0,35 *	0,64 *
	MOE	-0,22	0,74 *
<i>P. elliottii</i>	MOR	-0,59 *	0,79 *
	MOE	-0,50 *	0,85 *

(*) Correlação significativa à 5% de probabilidade de erro

(-) Os sinais negativos dos valores de R, indicam que as propriedades mecânicas são inversamente relacionadas ao teor de umidade da madeira.

Os valores médios de MOR e MOE, para lenhos adulto e juvenil de cada espécie, são apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente. A grande dispersão dos resultados, pode ser justificada pela influência do teor de umidade, somada à influência da variação na massa específica aparente da madeira ou outros fatores, como, ângulo de inclinação da grã, nós, etc.

Os valores médios de módulo de ruptura, foram mais baixos que os observados por TOMASELLI (1979) e MUÑIZ (1993) talvez porque, no presente estudo, foram obtidos em diferentes teores de umidade. Considerando apenas a classe de umidade entre 10 e 20%, os resultados se aproximaram aos obtidos por estes autores.

TABELA 6 - VALORES MÉDIOS DE MOR DE ACORDO COM O TIPO DE LENHO.

ESPÉCIE	LENHO	MOR médio (kgf/cm ²)	MOR médio (Pa)	Número de amostras	Desvio padrão	I.C. (95%)
<i>P. taeda</i>	Adulto	563,3 *	55,22	25	177,40	385,9 a 740,7
	Juvenil	496,06	48,63	25	142,84	353,3 a 638,9
<i>P. elliottii</i>	Adulto	701,4 *	68,76	25	174,19	527,21 a 875,5
	Juvenil	394,49	38,67	25	116,25	278,24 a 510,74

*Diferença significativa à 5% de probabilidade de erro.

MOR = Módulo de ruptura.

I.C. = Intervalo de confiança

A resistência e a rigidez do lenho adulto foi maior que os valores observados para o lenho juvenil, o que era esperado, uma vez que o lenho adulto apresenta uma massa específica maior, qualificando, por isso, o lenho adulto como ideal para utilização em estruturas.

Apesar dos valores médios serem inferiores aos observados por TOMASELLI (1979) e por MUÑIZ (1993), as diferenças entre as espécies e tipos de lenho foram semelhantes.

TABELA 7 - VALORES MÉDIOS DE MOE DE ACORDO COM O TIPO DE LENHO.

ESPÉCIE	LENHO	MOE médio (kgf/cm ²)	MOE médio (Pa)	Número de amostras	Desvio padrão	I.C.(95%)
<i>P. taeda</i>	Adulto	100159,8 *	9819,58	25	27734,24	72425,5 a 127894
	Juvenil	76520,66	7502,02	25	26835,79	49684,8 a 103356
<i>P. elliottii</i>	Adulto	111482,9 *	10929,69	25	29141,63	82341,3 a 140624
	Juvenil	52102,5	5108,08	25	16599,85	35502,6 a 68702

*Diferença significativa à 5% de probabilidade de erro

O lenho juvenil apresentou uma variabilidade maior, possivelmente pelo fato do mesmo ser formado com taxas de crescimento diferenciadas e, com isso, formar uma variedade de lenhos com diferentes massas específicas.

Para avaliar a magnitude do aumento da resistência e rigidez com a secagem da madeira, os valores médios de MOR e MOE, foram separados em classes de teor de umidade. O MOR e o MOE, aumentaram para madeira mais seca, abaixo do P.S.F.. O MOE, no entanto, aumentou em menor proporção que o MOR, indicando que a variação do teor de umidade afeta mais a resistência do que a rigidez da madeira (Tabelas 9 e 10). Este resultado é semelhante ao de observações realizadas pelo WOOD HANDBOOK (U.S.D.A. 1955), e as apresentadas por GERHARDS (1982) e TANAAMI (1986) que admitem uma menor influência do teor de umidade sobre a elasticidade da madeira, quando comparada à resistência.

O aumento de resistência com a redução do teor de umidade, foi maior para o lenho adulto que para o lenho juvenil das duas espécies, e pode ser justificado pela ocorrência, neste tipo de madeira, de maior proporção de lenho tardio, com paredes celulares mais espessas que no lenho juvenil. A resistência da madeira de *Pinus elliottii*, no entanto, sofreu maior influência do teor de umidade e da massa específica aparente que a de *Pinus taeda*. Isto pode ser consequência da maior massa específica aparente da madeira ou do maior teor de resina presente na madeira de *Pinus elliottii*. Para o MOE, não houve grandes diferenças entre os tipos de lenhos.

Para avaliar o acréscimo de resistência, foi testado também o intervalo de 0 a 10% de teor de umidade (Tabela 8). Neste intervalo foi constatado que o aumento de resistência e rigidez com a secagem da madeira foi pequeno; ou seja, a secagem abaixo de 10% para fins estruturais não é justificada. Em testes efetuados à teores de umidade acima de 30%, praticamente não foi observada variação em nenhuma das propriedades estudadas.

TABELA 8 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VALORES MÉDIOS DE MOR E MOE PARA TEORES DE UMIDADE ABAIXO DE 10% E ACIMA DE 30%.

Propriedade	U = 0% - 10%			U > 30%		
	Média	Desvio padrão	Número de amostras	Média	Desvio padrão	Número de amostras
MOR (kgf/cm ²)	518,25	296,12	10	296	105,99	10
MOE (kgf/cm ²)	91714,61	32604,54	10	43219	28515,89	10

Este resultado está de acordo com os resultados obtidos por LIMA (1983) e MECLAIN *et alli* (1984). Eles concluíram que as propriedades elásticas da madeira não são afetadas significativamente com a redução do teor de umidade abaixo da umidade de equilíbrio. TANAAMI (1986), também verificou a mesma tendência estudando a secagem da madeira de *Pinus elliottii*.

4.2.1.1 Estimativa do módulo de elasticidade.

Para avaliar a variação das propriedades mecânicas com o teor de umidade (U) e a massa específica aparente da madeira (γ), foram testados e comparados alguns dos modelos propostos na metodologia. A seleção dos modelos foi feita a partir do menor erro padrão da estimativa, melhor distribuição dos resíduos, maior coeficiente de determinação (R^2) e maior valor de F.

O modelo $\text{Log}(\gamma) = b_0 + b_1 \gamma + b_2 U + b_3 U^2$ foi considerado o melhor estimador do módulo de elasticidade, em função da massa específica aparente e da umidade da madeira, para as duas espécies e para o conjunto delas. Isto reflete a tendência de variação citada por

WILSON (1932) e pelo WOOD HANDBOOK (U.S.D.A., 1985), segundo os quais, os modelos logarítmicos são os mais indicados para avaliar as propriedades mecânicas em função dos teores de umidade.

TABELA 9 - VALORES MÉDIOS DE MOR PARA DUAS CLASSES DE UMIDADE.

ESPÉCIE	LENHO	U = 10% - 20%			U = 20% - 30%			Diferença do MOR entre as classes de umidade (%)
		MOR médio (kgf/cm ²)	Desvio padrão	n	MOR médio (kgf/cm ²)	Desvio padrão	n	
<i>P. taeda</i>	Adulto (A)	631,25	185,96	10	467,13	98,66	10	35,13
	Juvenil (J)	526,64	136,08	12	424,59	127,54	10	24,03
	A + J	558,74	158,84	22	455,70	103,99	20	22,61
<i>P. Elliottii</i>	Adulto (A)	738,50	162,02	11	515,64	111,12	10	43,32
	Juvenil (J)	450,58	95,83	10	356,03	86,97	9	26,55
	A + J	594,54	196,01	21	409,23	118,98	19	45,28

n = Número de observações.

TABELA 10 - VALORES MÉDIOS DE MOE PARA DUAS CLASSES DE UMIDADE.

		U = 10% - 20%			U = 20% - 30%			Diferença do MOR entre as classes de umidade (%)
ESPÉCIE	LENHO	MOE médio (kgf/cm ²)	Desvio padrão	n	MOE médio (kgf/cm ²)	Desvio padrão	n	
<i>P. taeda</i>	Adulto (A)	110016,8	25347,87	10	86768,4	27835,30	10	26,79
	Juvenil (J)	80453,9	29502,44	12	62311,4	28301,83	10	29,11
	A + J	89550,2	31190,33	22	80246,6	29161,61	20	11,59
<i>P. elliottii</i>	Adulto (A)	115421,0	28832,16	11	91792,7	26528,09	10	25,74
	Juvenil (J)	59760,2	14701,00	10	48280,2	7213,06	9	23,11
	A + J	87590,6	36148,64	21	62784,4	26112,03	19	39,51

n = Número de observações.

TABELA 11 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE COM SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.

Espécie	EQUAÇÕES MATEMÁTICAS	S _{xy} (%)	R ²	F
<i>P. taeda</i>	$\text{Log (MOE)} = 4,18 + 1,83 \gamma - 1,31 U^2$	13,05	0,414	21,91*
<i>P. elliottii</i>	$\text{Log (MOE)} = 3,94 + 1,86 \gamma - 2,99 U^2$	11,60	0,740	37,08*
<i>P. elliottii</i> + <i>P. taeda</i>	$\text{Log (MOE)} = 4,10 + 2,05 \gamma - 0,85 U$	13,02	0,553	64,27*

* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

γ - Massa específica aparente (g/cm³)

U - Teor de umidade da madeira (%)

Os valores de “t” do Teste de Student, para a constante b_0 e cada uma das variáveis independentes, encontram-se no Anexo 2.

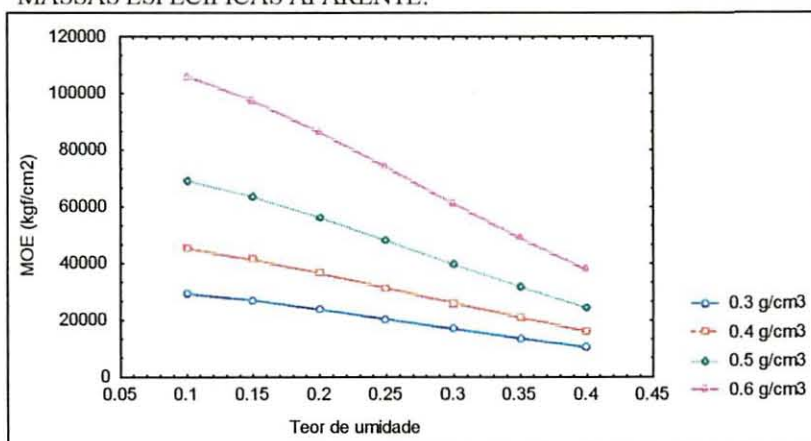
A análise gráfica dos resíduos das regressões, apresentadas nos Anexos 8 a 10, mostram que não existiu tendenciosidade nas estimativas.

O gráfico de valores observados, “versus” valores estimados, mostra que em ensaios de flexão estática, apesar das estimativas apresentarem muitos pontos fora do limite de confiança, os modelos podem ser úteis apenas para avaliar a tendência de variação do MOE com os seus respectivos teores de umidade e massas específicas aparente.

Apesar dos valores de coeficientes de determinação obtidos neste estudo serem menores que os obtidos por PIGOZZO (1983), MENDES (1984) e TANAAMI (1986), os modelos são válidos, visto que, estes autores adotaram o coeficiente de determinação (R^2) como critério de seleção dos modelos.

De modo geral, os altos valores do erro padrão da estimativa do MOE em flexão estática, em função da massa específica e teor de umidade da madeira, traduziram a baixa correlação entre esta propriedade e o teor de umidade da madeira, sendo mais significativa a influência da massa específica.

FIGURA 16 - VARIAÇÃO DO MOE COM O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA PARA VÁRIAS MASSAS ESPECÍFICAS APARENTE.



Na figura acima pode ser observado que a variação do MOE com o teor de umidade é maior para massa específicas maiores. Isto é importante para uma melhor classificação da rigidez da madeira quando se conhece o teor de umidade e a massa específica aparente.

4.2.1.2 Estimativa do módulo de ruptura.

O modelo $\text{Log}(y) = b_0 + b_1 \gamma + b_2 U + b_3 U^2$ foi o que apresentou o melhor ajuste aos valores de MOR, observados individualmente para madeira das duas espécies e para o conjunto das mesmas. A Tabela 12 apresenta os resultados da regressão.

Os valores do teste de “t de Student”, para testar a significância dos parâmetros nos modelos selecionados, são apresentados no Anexo 3.

TABELA 12 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DO MÓDULO DE RUPTURA E SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.

Espécie	EQUAÇÕES MATEMÁTICAS	Sxy (%)	R^2	F
<i>P. taeda</i>	$\text{Log (MOR)} = 2,11 + 1,35 \gamma - 3,42 U^2$	9,47	0,455	25,73*
<i>P. elliottii</i>	$\text{Log (MOR)} = 2,25 + 1,31 \gamma - 1,50 U$	8,58	0,772	71,31*
<i>P. elliottii</i> + <i>P. taeda</i>	$\text{Log (MOR)} = 2,05 + 1,56 \gamma - 1,80 U^2$	8,96	0,647	94,78*

* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

γ - Massa específica aparente (g/cm^3)

U - Teor de umidade da madeira (%)

Para o MOR em flexão, a relação entre umidade da madeira e resistência foi mais significativa, mostrando que o teor umidade é tão importante na estimativa dessa propriedade quanto a massa específica. Resultados semelhantes são apresentados por HELLMEISTER (1973) e por TANAAMI (1986).

De acordo com os resultados, a resistência à flexão da madeira das duas espécies, deve ser classificada pela massa específica, e também, pelo seu teor de umidade, pois as duas características físicas atuam significativamente na resistência.

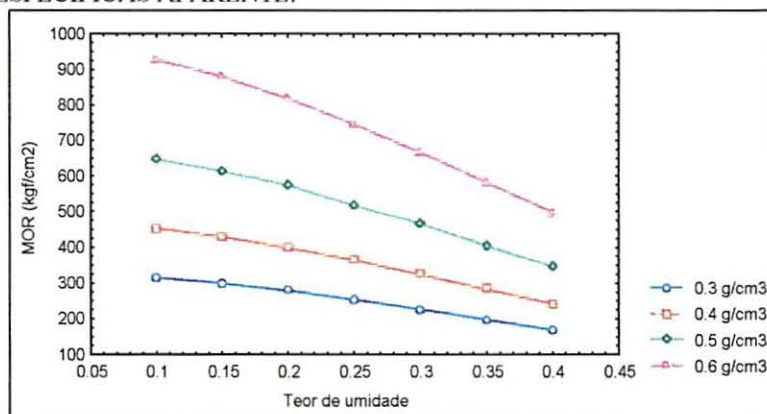
A análise de resíduos (Anexos 11 a 13), para a estimativa das propriedades mecânicas das três populações testadas, não demonstrou nenhuma tendenciosidade dos modelos, apesar de se configurarem alguns pontos observados muito distantes dos valores estimados, "outliers", ou seja, a variância permaneceu praticamente constante ao longo de todo o intervalo de validade do modelo.

Os gráficos que relacionam os valores estimados com os valores observados (Anexos 11 a 13), demonstram claramente o quanto estão próximos os valores estimados e observados.

Além do intervalo entre teor de umidade a 0% e madeira saturada, foram testados o intervalo correspondente à água de impregnação. Os modelos matemáticos citados

anteriormente permaneceram como os que apresentaram melhor ajuste aos dados observados, ainda com um menor erro padrão da estimativa e melhor distribuição de resíduos.

FIGURA 17 - VARIAÇÃO DO MOR COM A UMIDADE DA MADEIRA PARA VÁRIAS MASSAS ESPECÍFICAS APARENTE.



Na Figura 17, está ilustrada a variação da resistência da madeira das duas espécies com o teor de umidade para varias massas específicas aparentes. Este gráfico foi gerado a partir da equação obtida pelo processo de regressão, para estimativa do MOR das duas espécies em estudo. Uma das utilidades práticas deste tipo de gráfico, é a possibilidade de, em se conhecendo as cargas impostas a uma estrutura, determinar qual o teor de umidade e a massa específica aparente que a madeira deve possuir para resistir ao esforço solicitante, ou conhecendo-se o teor de umidade e a massa específica, determinar qual a resistência máxima que a madeira suportará.

4.2.2 VARIAÇÃO DA RAZÃO ENTRE A TENSÃO NO LIMITE ELÁSTICO E A TENSÃO DE RUPTURA COM O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA.

A variação do teor de umidade da madeira está relacionado com a razão entre a tensão no limite de proporcionalidade ($T_{lim.}$) e a tensão de ruptura ($T_{rup.}$). Esta razão é utilizada para o cálculo de um dos coeficientes de redução, utilizados na determinação das tensões admissíveis. De acordo com BAUER(1985) e PFEIL (1989), essa relação é igual a 9/16 para madeiras com 15% de umidade, e este, é o valor adotado pela NB-11 para o cálculo e execução de estruturas de madeira.

Na Tabela 13, são apresentados os valores médios obtidos para a razão $T_{lim}/T_{rup.}$. Estes, comparados com o valor 0,562 (9/16), apresentaram diferenças significativas para as duas espécies. Portanto, esta diferença demonstra que os valores utilizados na prática de dimensionamento de peças estruturais de madeira, podem variar de acordo com o seu teor de umidade.

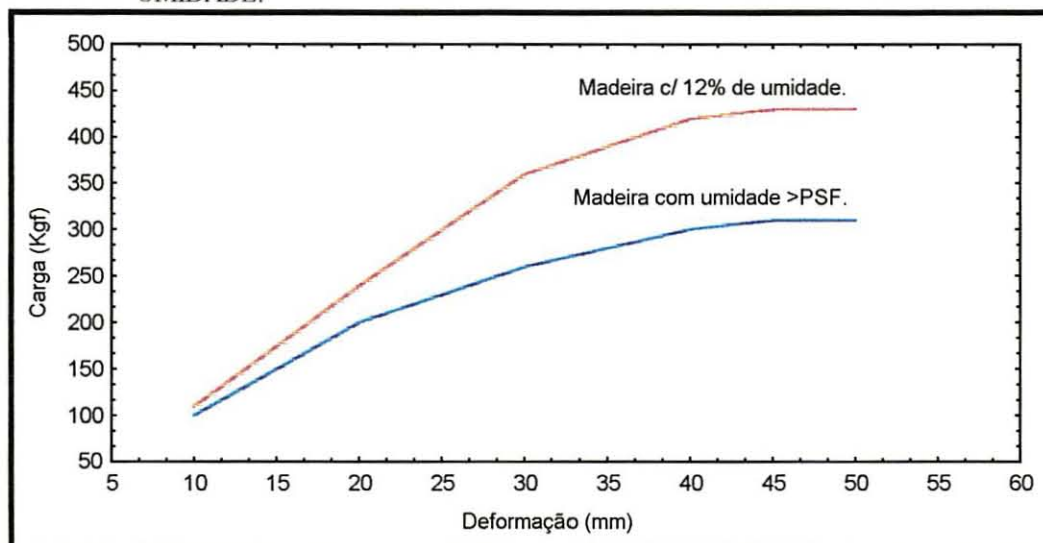
Comparativamente, a tensão no limite de proporcionalidade se distanciou da tensão de ruptura quando a umidade da madeira estava acima do P.S.F., e se aproximou desta quando a madeira estava seca (Figura 18).

TABELA 13 - COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DA RELAÇÃO $T_{LIM}/T_{RUP.}$ NO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA COM O VALOR 0,562 (9/16).

Espécie	$T_{lim}/T_{rup.}$	Desvio padrão	n	Erro padrão	"t de Student"
<i>P. elliottii</i>	0,677*	0,078	50	0,0121	9,456
<i>P. taeda</i>	0,699*	0,096	50	0,0125	10,152

*Diferença significativa à 5% de probabilidade de erro
n = Número de observações;

FIGURA 18 - CURVA CARGA/DEFORMAÇÃO PARA MADEIRAS VERDE E SECA ATÉ 12 % DE UMIDADE.



Apesar das tensões no limite elástico e de ruptura terem aumentado muito com o teor de umidade, o módulo de elasticidade, que é representado pela inclinação da curva até o limite elástico, não aumentou na mesma proporção.

4.2.3 COMPRESSÃO PARALELA À GRÃ

A distribuição dos valores de MOE e MOR, observados no ensaio de compressão paralela, é mostrada graficamente nas Figuras 19 e 20. Nelas, pode ser verificado o comportamento dessas propriedades, quando variam a massa específica aparente e o teor de umidade da madeira, para ambas as espécies.

Como citado anteriormente, esta tendência também foi verificada por outros autores, como, WILSON (1932), KOLLMANN e COTÊ Jr. (1968) e KOCH (1972).

FIGURA 19 - VARIAÇÃO DO MOR E DO MOE COM A UMIDADE DA MADEIRA.

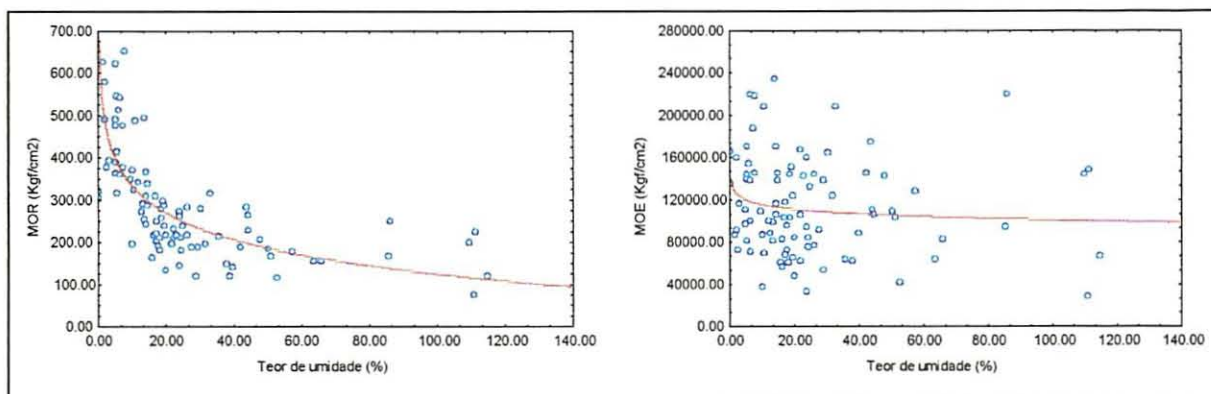
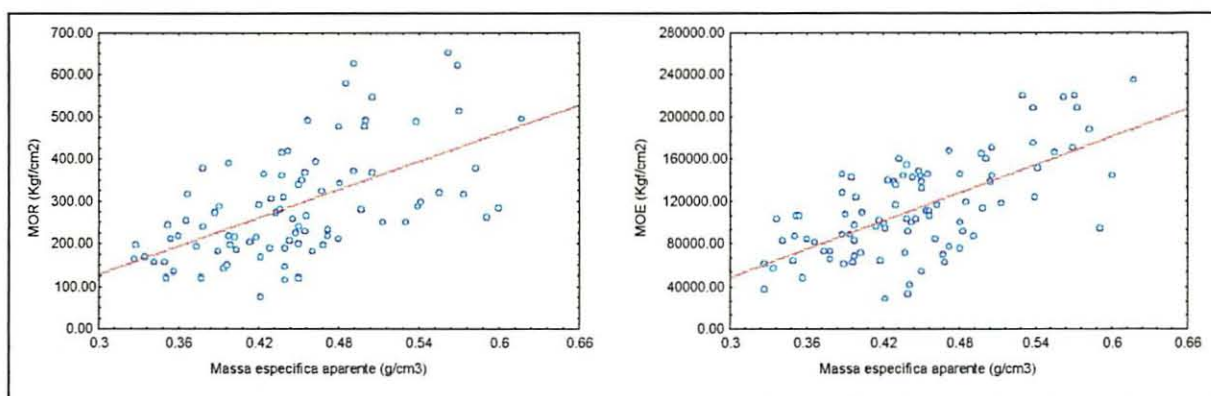


FIGURA 20 - VARIAÇÃO DO MOR E DO MOE COM A MASSA ESPECÍFICA APARENTE.



De acordo com as figuras acima, a relação entre o MOR e o teor de umidade é clara e bem definida, enquanto a relação MOE/teor de umidade não apresenta uma tendência bem definida. A variação do MOR e do MOE com a massa específica é semelhante, e está melhor definida para as duas propriedades. Este resultado é comparável ao obtido por WANGAARD (1950), que observou uma estreita correlação linear entre propriedades mecânicas e massa específica da madeira de várias espécies. Esta tendência foi observada também por BROWN *et alli* (1952), KOLLMANN e COTÊ Jr. (1968) e BAUER (1985).

De acordo com os valores de R, mostrados na Tabela 14, o módulo de elasticidade, em compressão paralela, observado para as duas espécies, praticamente não foi afetado pela variação do teor de umidade da madeira. Este fato pode ser justificado pela deformação

relativa da madeira não diminuir na mesma proporção em que aumenta a resistência quando a madeira é seca à teores de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras. Essa observação também foi feita pelo U.S.D.A. (1955), por JOHNSON (1965), GERHARDS (1982) e MECLAIN *et alli* (1984).

TABELA 14 - CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS, A MASSA ESPECÍFICA APARENTE E O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA.

Espécie	Propriedade	Teor de umidade	Massa específica aparente
<i>P. taeda</i>	MOE	-0,14	0,73 *
	MOR	-0,62 *	0,69 *
<i>P. elliottii</i>	MOE	-0,08	0,69 *
	MOR	-0,61 *	0,42 *

* Correlações significativas à 5% de probabilidade de erro.

(-) Valores negativos indicam que a relação entre as variáveis é inversa.

A massa específica, apresentou-se como um bom indicador da rigidez e da resistência, porém, o teor de umidade se mostrou importante apenas na avaliação do MOR das duas espécies.

Para avaliar a influência da variação do teor de umidade sobre o MOR dos lenhps adulto e juvenil, os valores observados foram subdivididos em classes de umidade entre 10 e 20%, e maior que 30%. Na Tabela 15, pode ser constatado o decréscimo da resistência à medida que ocorre aumento do teor de umidade da madeira.

TABELA 15 - VALORES MÉDIOS DE MOR PARA DIFERENTES CLASSES DE UMIDADE E LENHO.

ESPÉCIE	LENHO	U=10-20%			U > 30%			Diferença entre as classes (%)
		MOR (kgf/cm ²)	Desvio padrão	n	MOR (kgf/cm ²)	Desvio padrão	n	
<i>P. taeda</i>	Adulto (A)	262,94	45,85	10	182,64	27,98	10	43,94
	Juvenil (J)	229,04	55,10	10	169,33	40,50	10	35,96
	A + J	237,11	54,01	20	176,45	30,68	20	34,37
<i>P. elliottii</i>	Adulto (A)	378,50	74,48	10	260,57	39,29	10	45,25
	Juvenil (J)	255,53	60,94	10	121,79	37,63	10	109,81
	A + J	337,50	90,61	20	210,10	58,09	20	60,63

n = NUMERO DE OBSERVAÇÕES

U = Teor de umidade em (%)

Pode ser observado, também, que o aumento de resistência com a secagem da madeira foi maior para madeira de *Pinus elliottii*.

Entre os lenhos, o adulto de *Pinus taeda* apresentou um ganho de resistência à compressão paralela ligeiramente maior que o lenho juvenil. Em *Pinus elliottii* ocorreu o inverso, ou seja, o lenho juvenil apresentou um ganho maior que o adulto. Isto provavelmente ocorreu devido a madeira de *Pinus elliottii* apresentar massa específica aparente maior do que a madeira de *Pinus taeda*, como mostrado na Tabela 16.

Além da massa específica aparente, a madeira de *Pinus elliottii* apresentou também, maior percentagem média de lenho tardio 44,29%, contra 32,98% de *Pinus taeda*, e com isso, maior disponibilidade de sítios higroscópicos na parede celular (área superficial das microfibrilas).

TABELA 16 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE PARA AS DUAS ESPÉCIES.

Espécie	Massa específica aparente média (g/cm ³)	Coefficiente de variação (%)	Número de observações
<i>P. taeda</i>	0,413	14,52	50
<i>P. elliottii</i>	0,474	12,78	50

Foi verificado ainda que, em classes de teor de umidade abaixo de 10%, o aumento de resistência e rigidez foi menor que nas demais classes, e as correlações entre propriedades e teor de umidade apresentaram valores mais baixos, indicando que a secagem da madeira abaixo deste ponto, pouco contribui para as propriedades de resistência da madeira. A redução da correlação, para estimativas em teores de umidade abaixo de 10%, foi verificada também por MECLAIN *et alli* (1984).

A subdivisão em classes de umidade para os lenhos adulto e juvenil das duas espécies, foi aplicada também aos valores de MOE (Tabela 17). Os resultados mostram que o módulo de elasticidade não foi influenciado pela variação do teor de umidade da madeira, da mesma forma que o módulo de ruptura, conclusão semelhante a obtida por JOHNSON (1965).

TABELA 17 - VALORES MÉDIOS DE MOE PARA DIFERENTES CLASSES DE UMIDADE E LENHO.

ESPÉCIE	LENHO	U=10-20%	Desvio padrão	n	U > 30%	Desvio padrão	n	Diferença entre classes (%)
		MOE (kgf/cm ²)			MOE (kgf/cm ²)			
<i>P. taeda</i>	Adulto (A)	103269,5	32158,1	10	105479,3	31812	10	-2,09
	Juvenil (J)	89813,30	26126,6	10	96085,34	27317	10	-6,52
	A + J	93017,23	29253,9	20	101143,68	28987	20	-8,03
<i>P. elliottii</i>	Adulto (A)	141958,1	39095,2	10	166903,1	39038	10	-14,94
	Juvenil (J)	80893,48	43682,4	10	58429,14	11890	10	38,47
	A + J	121603,2	52946	20	127468	51828	20	-4,60

n = NÚMERO DE OBSERVAÇÕES

U = TEOR DE UMIDADE EM (%)

De acordo com os resultados, a variação do MOE com a umidade foi praticamente nenhuma. Para o tipo de lenho, foi verificado que o lenho juvenil apresentou maior aumento, enquanto os demais apresentaram perda de rigidez em compressão. Isto indica que a madeira de *Pinus elliottii* foi mais sensível à variação do teor de umidade, confirmando as observações efetuadas anteriormente. Este resultado contraria a tendência verificada em trabalhos publicados por vários autores, os quais afirmam que o módulo de elasticidade, obtido no ensaio de compressão paralela à grã, aumenta com a redução do teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras. Isto pode ser justificado pelo fato de que a tensão no limite de proporcionalidade foi muito afetada pela variação da massa específica, e que a classificação de lenho juvenil e adulta não é adequada para espécies de rápido crescimento que ainda não atingiram a estabilização da taxa de crescimento, e com isso, não evidenciando a influência da redução do teor de umidade sobre a elasticidade.

4.2.3.1 Estimativa do módulo de elasticidade

Dentre os modelos testados, o que melhor se ajustou aos dados observados foi o modelo $\text{Log}(y) = b_0 + b_1U + b_2\gamma + b_3U^2$. As equações resultantes da regressão estão apresentadas na Tabela 18:

TABELA 18 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, E SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.

Espécie	EQUAÇÕES MATEMÁTICAS	Sxy (%)	R^2	F
<i>P. taeda</i>	$\text{Log}(\text{MOE}) = 4,22 + 1,89 \gamma$	11,76	0,482	43,83*
<i>P. elliottii</i>	$\text{Log}(\text{MOE}) = 4,01 + 2,12 \gamma$	16,18	0,381	29,97*
<i>P. elliottii</i> + <i>P. taeda</i>	$\text{Log}(\text{MOE}) = 4,28 + 1,64 \gamma$	14,87	0,355	52,79*

* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

γ = Massa específica aparente (g/cm^3);

MOE = Módulo de elasticidade (kgf/cm^2)

De acordo com o teste de “t de Student”, as variáveis U e U^2 não apresentaram significância no modelo, para nenhuma das espécies.

4.2.3.2 Estimativa do módulo de ruptura

Para estimativa do MOR da madeira das duas espécies e do conjunto delas, o modelo matemático $\text{Log}(y) = b_0 + b_1U + b_2\gamma + b_3U^2$ foi o que melhor se ajustou aos dados observados. A Tabela 19 mostra as equações resultantes do ajuste, com os seus respectivos valores de F, R^2 e erro padrão da estimativa.

TABELA 19 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADOS PARA ESTIMATIVA DO MÓDULO DE RUPTURA, E SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.

Espécie	EQUAÇÕES MATEMÁTICAS	Sxy (%)	R^2	F
<i>P. taeda</i>	$\text{Log (MOR)} = 2,07 + 1,35 \gamma - 1,80 U + 2,09 U^2$	6,20	0,834	78,14*
<i>P. elliottii</i>	$\text{Log (MOR)} = 2,11 + 1,22 \gamma - 1,44 U + 0,95 U^2$	11,70	0,691	36,04*
<i>P. elliottii</i> + <i>P. taeda</i>	$\text{Log (MOR)} = 2,10 + 1,17 \gamma - 1,18 U + 0,75 U^2$	10,00	0,720	81,97*

* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

γ = Massa específica aparente (g/cm^3);

U = Teor de umidade da madeira (%).

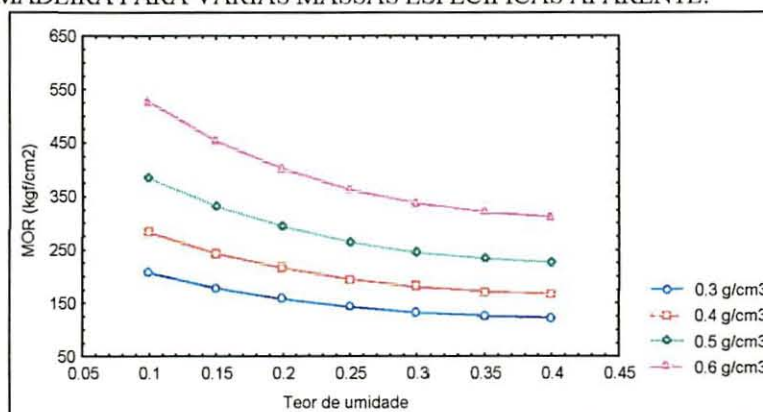
MOR = Módulo de ruptura (kgf/cm^2)

De acordo com o teste de “t de Student”, mostrado no Anexo 5, todas variáveis foram significativas nos modelos selecionados, aplicados às duas espécies e ao conjunto delas.

A análise gráfica dos resíduos demonstrou, pela dispersão dos valores observados em relação aos estimados, que os modelos foram mais precisos para valores de MOR próximos às médias. A distribuição dos resíduos, mostrada nos Anexos 17 a 19, indicou também, que os modelos não são tendenciosos.

A Figura 21 ilustra a variação do MOR estimado com o teor de umidade da madeira para várias massa específicas aparentes. Pode ser visto, novamente, que o ganho de resistência com a secagem, foi maior para madeiras com massas específicas mais altas e para o intervalo entre o P.S.F. e o teor de umidade de 10%. Eventualmente, este gráfico pode auxiliar na tomada de decisão sobre a utilização mais econômica da madeira para fins estruturais.

FIGURA 21 - VARIAÇÃO DO MOR EM COMPRESSÃO PARALELA À GRÃ COM A UMIDADE DA MADEIRA PARA VÁRIAS MASSAS ESPECÍFICAS APARENTE.



4.2.3.3 Comparação dos MOE's obtidos em flexão estática e compressão paralela à grã.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 20, os MOE's obtidos a partir do ensaio de compressão paralela, foram superiores aos obtidos a partir do ensaio de flexão estática. Isto demonstra que o ensaio de flexão estática é o mais indicado para obtenção do MOE, por apresentar valores mais baixos. Conclusão semelhante foi obtida por KOLLMANN e COTÊ Jr. (1968), e GEIGER¹, citado por MUÑIZ (1993).

TABELA 20 - COMPARAÇÃO DO MOE EM FLEXÃO ESTÁTICA COM O MOE EM COMPRESSÃO PARALELA.

Espécie	Ensaio	MOE médio (kgf/cm ²)	Erro padrão	Desvio padrão	n
<i>P. elliottii</i>	Compressão	117177,4	7260,14	50819,8	50
	Flexão	76959,43	5665,24	37148,1	50
<i>P. taeda</i>	Compressão	108778,4	5587,11	38300,8	50
	Flexão	86764,27	3942,10	30540,9	50

n = Número de observações;
MOE = Módulo de elasticidade.

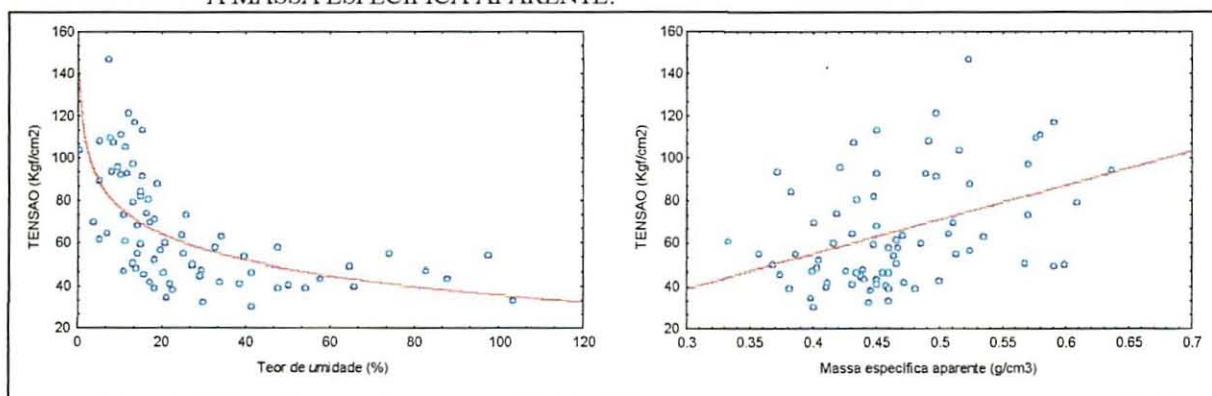
¹ GEIGER, K. Baruscsitchigung der schubuerformung bei der Ermittlung des elostizitatsmodulus van Holz in statiachen. Biegeversuch. Holztechnologie. V.2, n.2, p.102-106. 1950.

4.2.4 CISALHAMENTO NA DIREÇÃO TANGENCIAL AOS ANÉIS DE CRESCIMENTO

Os valores observados de tensão de cisalhamento na direção tangencial aos anéis de crescimento, para a madeira das duas espécies, são mostrados na Figura 22.

A tensão de cisalhamento, alocada no eixo Y, foi relacionada com as variáveis massa específica aparente e teor de umidade, alocada no eixo dos X.

FIGURA 22 - VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO TANGENCIAL COM A UMIDADE E COM A MASSA ESPECÍFICA APARENTE.



A variação da tensão de cisalhamento tangencial com a umidade da madeira seguiu uma tendência decrescente até o P.S.F., a partir do qual, a tensão permaneceu praticamente constante. Esta tendência não foi tão bem definida como para as demais propriedades estudadas, pois foi verificada uma dispersão muito grande. Este fato também foi constatado por WILSON (1932).

De acordo com a Tabela 21, o teor de umidade teve uma correlação significativa com a tensão de cisalhamento tangencial, principalmente para madeira de *Pinus elliottii*.

A massa específica aparente, apesar de ter significância estatística, apresentou correlações baixas, não sendo portanto uma boa indicadora desta propriedade.

TABELA 21 - CORRELAÇÕES ENTRE A TENSÃO DE CISALHAMENTO NA DIREÇÃO TANGENCIAL, AOS ANÉIS DE CRESCIMENTO, MASSA ESPECÍFICA APARENTE E TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA.

Espécie	Teor de umidade	Massa específica aparente
<i>P. taeda</i>	-0,46 *	0,43 *
<i>P. elliottii</i>	-0,68 *	0,35 *

* Correlação significativa à 5% de probabilidade de erro.

(-) O sinal negativa indica que a relação é inversa.

O efeito do teor de umidade sobre a resistência ao cisalhamento, pode ser melhor visualizado pela análise apresentada na Tabela 22, a qual apresenta os valores médios de tensão para classes de umidade entre 10 e 20% e acima de 30%, dos lenhos adulto e juvenil das duas espécies.

Como pode ser observado na Tabela 22, o lenho adulto de *Pinus elliottii* apresentou resistência máxima de 83,84 kgf/cm² para o intervalo de umidade entre 10 e 20%, no qual se encontram a maior parte das umidades de equilíbrio, e de 47,16 kgf/cm² para o teor de umidade acima de 30%, diferindo em aproximadamente 77%.

TABELA 22 - VALORES MÉDIOS DE TENSÃO DE CISALHAMENTO TANGENCIAL PARA DIFERENTES CLASSES DE UMIDADE E LENHO.

ESPÉCIE	LENHO	U=10-20%			U>30%			Diferença entre classes (%)
		Tensão (kgf/cm ²)	Desvio padrão	n	Tensão (kgf/cm ²)	Desvio padrão	n	
<i>P. taeda</i>	Adulto	73,25	14,67	10	47,84	10,21	10	34,68
	Juvenil	61,13	13,58	10	39,75	8,91	10	34,97
<i>P. elliottii</i>	Adulto	83,84	21,97	10	47,16	11,43	10	77,77
	Juvenil	83,17	9,04	10	47,63	7,13	10	74,61

n = Número de observações

U = Teor de umidade da madeira (%)

Comparando com os resultados das demais propriedades, foi constatado que, para madeira de *Pinus elliottii*, a resistência ao cisalhamento tangencial foi grandemente influenciada pela variação do teor de umidade. Porém, a influência do tipo de lenho, adulto ou juvenil, das duas espécies, não foi tão expressiva quanto nas outras propriedades até aqui estudadas. Isto é importante em termos de classificação da madeira quando se conhecem os teores de umidade. Este resultado está de acordo com os obtidos por BROWN *et alli* (1952).

4.2.4.1 Estimativa da tensão de cisalhamento tangencial.

De acordo com os requisitos adotados para seleção dos modelos matemáticos que melhor representam a tensão de cisalhamento tangencial em função do seu teor de umidade e da sua massa específica aparente, a expressão $\text{Log. } (\tau) = b_0 + b_1U + b_2\gamma + b_3U^2$, foi considerada a ideal, para representar os dados observados das duas espécies e para o conjunto delas. Os valores dos coeficientes, com os respectivos valores de “t de Student”, são apresentados no Anexo 6.

A Tabela 23 apresenta as equações obtidas a partir do cálculo de regressão, para as duas espécies e para o conjunto das mesmas.

O erro padrão da estimativa foi praticamente o mesmo para as três populações estudadas, *Pinus elliottii*, *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* + *Pinus taeda*. O baixo coeficiente de determinação, mostra que as variáveis independentes não explicam com precisão a variável dependente.

A análise dos resíduos mostrou que não houve tendenciosidade, e que o ajuste foi mais preciso para valores de tensão próximos à média e para teores de umidade no intervalo entre 10 e 20%.

TABELA 23 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA DIREÇÃO TANGENCIAL AOS ANÉIS DE CRESCIMENTO, E SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.

Espécie	EQUAÇÕES MATEMÁTICAS	S _{xy} (%)	R ²	F
<i>P. taeda</i>	$\text{Log}(\tau) = 1,51 + 1,18\gamma - 1,86 U + 1,82 U^2$	11,29	0,521	15,16*
<i>P. elliottii</i>	$\text{Log}(\tau) = 1,78 + 0,468\gamma - 1,08 U + 0,73 U^2$	9,90	0,603	20,77*
<i>P. elliottii</i> + <i>P. taeda</i>	$\text{Log}(\tau) = 1,61 + 0,81\gamma - 1,22 U + 0,92 U^2$	10,95	0,541	32,14*

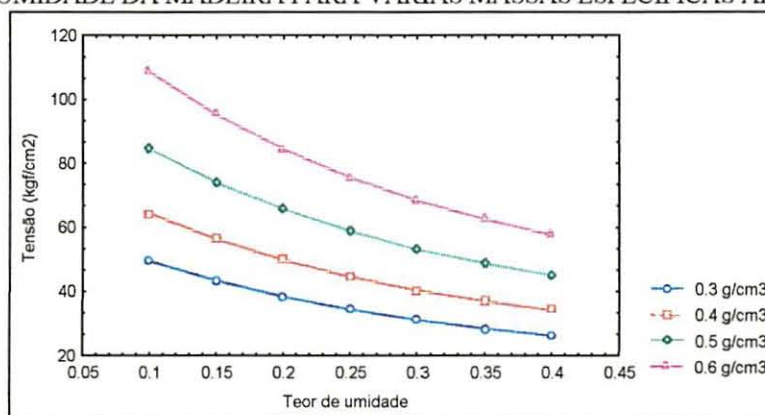
* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

γ = Massa específica aparente (g/cm³);

U = Teor de umidade da madeira (%).

τ = Tensão de cisalhamento tangencial (kgf/cm²).

FIGURA 23 - VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO TANGENCIAL COM O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA PARA VÁRIAS MASSAS ESPECÍFICAS APARENTE.



As curvas apresentadas na Figura 23, foram geradas a partir de uma das equações obtidas pelo processo de regressão, e ilustra a variação da tensão de cisalhamento máxima com os teores de umidade e massas específicas aparentes para a madeira das duas espécies. Pode-se notar que o aumento de resistência foi, percentualmente, muito maior do que para as outras propriedades, mas a tendência foi a mesma. Por exemplo, para resistir à uma carga de cerca de

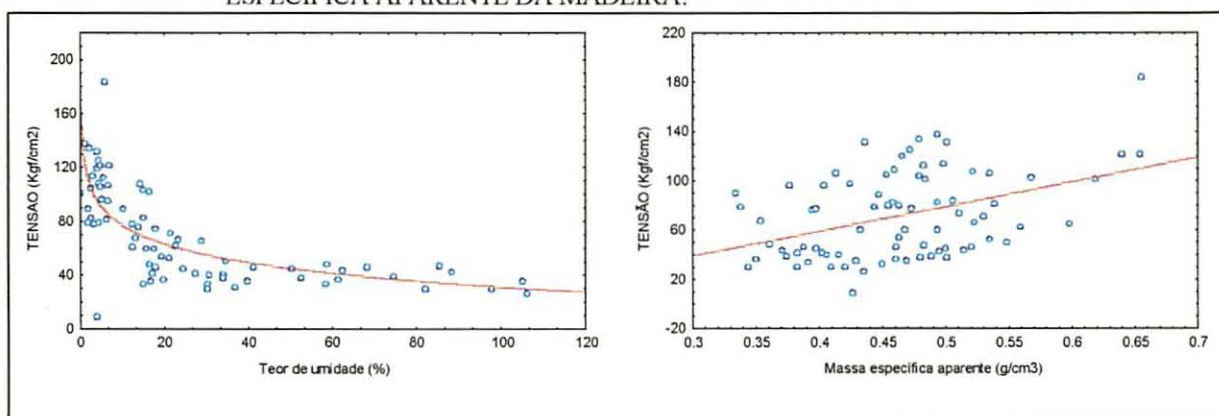
80 kgf/cm², o teor de umidade da madeira deve ser de 40% para uma massa específica de 0,6 g/cm³, e de 25% para uma massa específica aparente de 0,5 g/cm³.

4.2.5 CISALHAMENTO RADIAL

Na direção radial, a resistência ao cisalhamento também apresentou grande influência do teor de umidade, principalmente para madeira de *Pinus elliottii*. A massa específica, apresentou importância apenas para madeira de *Pinus elliottii*.

A Figura 24 ilustra a variação da tensão de cisalhamento na direção radial, com os respectivos teores de umidade e massas específicas aparentes.

FIGURA 24 - VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL COM A UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA MADEIRA.



Da mesma forma que no ensaio de cisalhamento tangencial, foi verificado que a dispersão da variação da resistência com a massa específica aparente foi grande, enquanto para a umidade da madeira, esta dispersão foi menor, e a tendência de variação ficou melhor estabelecida.

A correlação entre o teor de umidade da madeira, massa específica aparente e resistência ao cisalhamento radial, mostrou que o primeiro teve maior influência na resistência da madeira de *Pinus elliottii*. Para madeira de *Pinus taeda*, a correlação foi baixa, apesar de significativa. Isto confirma a tendência verificada para outras propriedades, onde a madeira de *Pinus elliottii* sofreu maior acréscimo de resistência com a secagem.

Para madeira de *Pinus elliottii* a massa específica aparente teve baixa correlação com a resistência ao cisalhamento, indicando que esta propriedade contribui de forma menos expressiva para o aumento de resistência. Para madeira de *Pinus taeda*, a massa específica aparente não foi significativamente relacionada com a resistência ao cisalhamento.

TABELA 24 - CORRELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E A TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL.

Espécie	Teor de umidade	Massa específica aparente
<i>P. taeda</i>	-0,53*	0,27
<i>P. elliottii</i>	-0,76*	0,54*

* Correlações significativas à 5% de probabilidade de erro.

(-) O sinal negativo indica que a relação entre as variáveis é inversa.

Analisando a resistência ao cisalhamento dos lenhos adulto e juvenil das duas espécies, em diferentes classes de umidade correspondentes, ficou evidente o aumento de resistência com a secagem abaixo do P.S.F..

A Tabela 25 mostra os valores médios para cada tipo de lenho, em cada classe de umidade. Como exemplo, a tensão de cisalhamento de lenho adulto de *Pinus taeda* aumentou de 40,07 para 60,24 kgf/cm², quando a madeira passou da classe de umidade maior que 30% para seca entre 10 e 20%. Este acréscimo de resistência com a secagem, é bem superior ao observado por BENDTSEN (1978). O referido autor obteve um ganho de apenas 13%, quando a madeira passou dos níveis de madeira verde para umidade de equilíbrio à 15%.

TABELA 25 - VALORES MÉDIOS DE TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL PARA DIFERENTES CLASSES DE UMIDADE E LENHO.

ESPÉCIE	LENHO	U=10-20%			U>30%			Diferença entre classes (%)
		Tensão (kgf/cm ²)	Desvio padrão	n	Tensão (kgf/cm ²)	Desvio padrão	n	
<i>P. taeda</i>	Adulto	60,24	16,88	10	40,07	10,59	10	50,33
	Juvenil	60,49	11,31	10	39,93	6,50	10	51,49
<i>P. elliottii</i>	Adulto	85,21	16,70	10	41,31	7,48	10	106,01
	Juvenil	60,36	12,86	10	34,37	6,77	10	75,61

n = Número de observações

U = Teor de umidade da madeira (%)

O aumento de resistência com a secagem da madeira, foi maior para madeira de *Pinus elliottii* do que para madeira de *Pinus taeda*. Entre os lenhos, dentro das espécies, o ganho foi maior para o lenho adulto de *Pinus elliottii*, não diferindo para os lenhos adulto e juvenil de *Pinus taeda*. Isto confirma a tendência já observada, de que os ganhos de resistência com a secagem, são maiores para madeiras de lenho adulto, principalmente do *Pinus elliottii*, onde a variação das características anatômicas do lenhos adulto e juvenil são maiores do que no *Pinus taeda*.

Os estudos efetuados por WILSON (1932), chegaram a valores de ganho semelhantes aos apresentados na Tabela 29. Os resultado obtidos por este autor estão ilustrados graficamente na Figura 5 (pág. 25).

4.2.5.1 Estimativa da tensão de cisalhamento na direção radial.

Dentre os modelos testados, a equação $\text{Log } (\tau) = b_0 + b_1U + b_2\gamma + b_3U^2$ foi a que apresentou o melhor ajuste aos valores observados, para as duas espécies e para o conjunto das mesmas, com o menor erro padrão da estimativa, maior valor de F e um bom coeficiente de determinação. Os valores de “t de Student” para os parâmetros do modelo, são mostrados no Anexo 7. Apenas a massa específica aparente de *Pinus taeda* não apresentou significância no modelo, mesmo assim, a probabilidade de significância foi de 94% para *Pinus elliottii* e 93% para *Pinus taeda*.

TABELA 26 - EQUAÇÕES MATEMÁTICAS SELECIONADAS PARA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL E SEUS RESPECTIVOS ERRO-PADRÃO DA ESTIMATIVA, R^2 E VALORES DE F.

Espécie	EQUAÇÕES MATEMÁTICAS	Sxy (%)	R^2	F
<i>P. taeda</i>	$\text{Log } (\tau) = 1,57 + 1,02 \gamma - 1,80 U + 1,80 U^2$	18,90	0,297	6,32*
<i>P. elliottii</i>	$\text{Log } (\tau) = 1,48 + 1,14 \gamma - 1,37 U + 0,91 U^2$	7,80	0,883	100,03*
<i>P. elliottii</i> + <i>P. taeda</i>	$\text{Log } (\tau) = 1,52 + 1,05 \gamma - 1,38 U + 0,97 U^2$	14,67	0,582	38,16*

* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

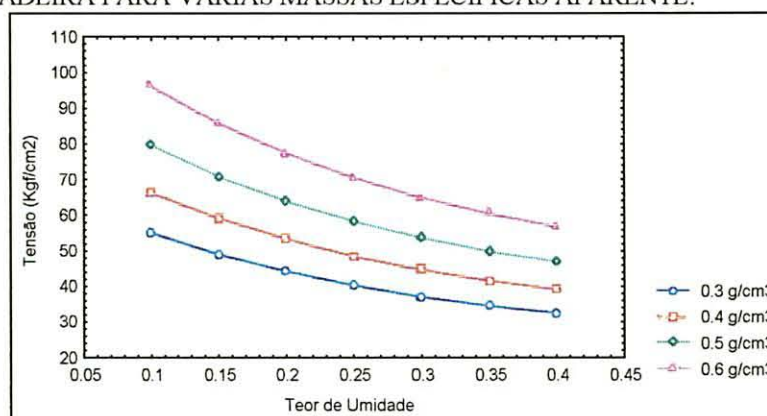
γ = Massa específica aparente (g/cm³);

U = Teor de umidade da madeira (%).

Apenas para madeira de *Pinus elliottii*, o resultado do ajuste foi satisfatório, apresentando um erro padrão de apenas 7,8%. A análise de resíduos, ilustrada nos Anexos 23 a 25, mostrou que não houve tendenciosidade, sendo o modelo eficaz ao longo de toda amplitude dos valores observados. O gráfico de valores estimados “versus” valores observados, mostrou que o modelo cobre grande parte dos pontos dentro do intervalo de confiança de 95%.

A análise dos resíduos, indicou, também, que os mesmos seguiram a distribuição dos valores observados, ou seja, os resíduos não estiveram concentrados em nenhuma classe de frequência, havendo, portanto, poucos “Outliers” (pontos com mais de 2,5 vezes o desvio padrão).

FIGURA 25 - VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL COM O TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA PARA VÁRIAS MASSAS ESPECÍFICAS APARENTE.



A Figura 25, ilustra o gráfico gerado a partir da equação obtida no processo de regressão para estimativa da resistência ao cisalhamento radial. A tendência de aumento da resistência ao cisalhamento foi a mesma verificada até agora. A menor influência da massa específica pode ser visualizada pela maior proximidade entre as curvas, mas a influência do teor de umidade é bastante expressiva, principalmente para madeira com massa específica maior.

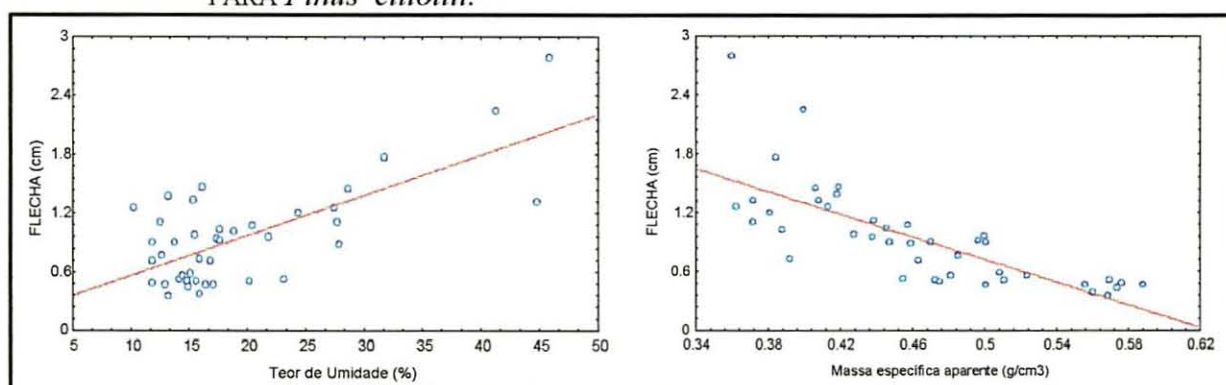
4.2.6 RIGIDEZ NO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO.

O ensaio de flexão, através do método não destrutivo, também pode ser utilizado para avaliação das propriedades mecânicas, e suas variações relacionadas com as propriedades

físicas da madeira. Este tipo de ensaio oferece a vantagem de utilizar mais de uma vez o mesmo corpo de prova e, assim, classificar a madeira de acordo com as deformações.

A Figura 26 mostra os valores das flechas (deformações), observadas para madeira de *Pinus elliottii*, e sua variação com os seus respectivos teores de umidade e massas específicas aparente.

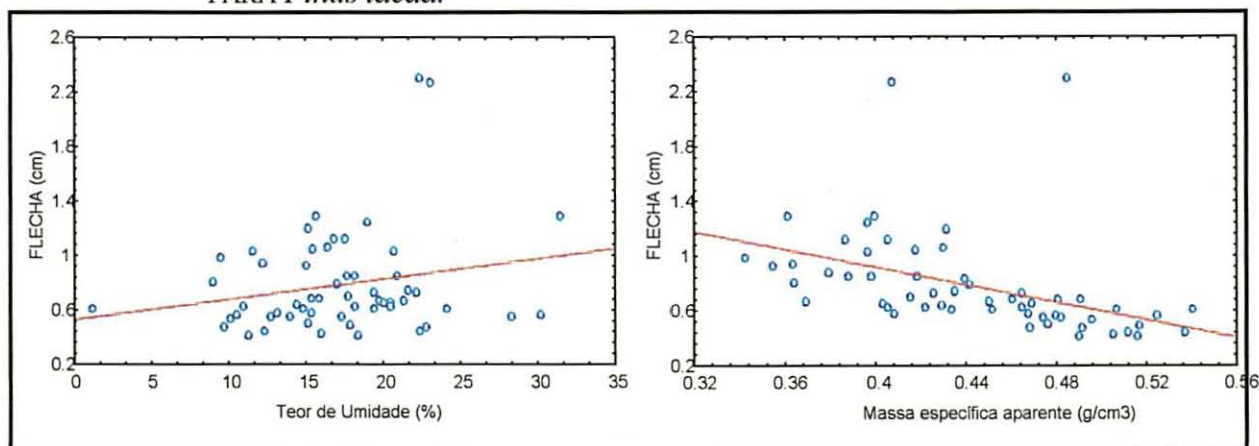
FIGURA 26 - VARIAÇÃO DA FLECHA COM O TEOR DE UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE PARA *Pinus elliottii*.



As tendências apresentadas, mostram que a flecha aumentou à medida em que aumentou o teor de umidade, e diminuiu com o aumento da massa específica. Isto é importante do ponto de vista prático, uma vez que deve-se utilizar madeira mais seca e de maior massa específica para evitar grandes deformações nas estruturas.

A Figura 27, mostra a mesma variação para madeira de *Pinus taeda*. A tendência verificada foi a mesma, muito embora, a relação entre a flecha e o teor de umidade não tenha sido bem definida.

FIGURA 27 - VARIAÇÃO DA FLECHA COM O TEOR DE UMIDADE E MASSA ESPECÍFICA APARENTE PARA *Pinus taeda*.



A análise de correlações (Tabela 27) mostrou que o teor de umidade da madeira e a massa específica aparente, apresentaram baixas correlações com a flecha, mostrando que com a diminuição da umidade e com o aumento da massa específica aparente, aumentou muito pouco a rigidez das duas espécies, resultado este, semelhante ao obtido por PIGOZZO (1983).

TABELA 27 - CORRELAÇÃO ENTRE A FLECHA NO ENSAIO NÃO DESTRUTIVO E AS PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

ESPÉCIE	Teor de umidade	Massa específica aparente.
<i>P. elliottii</i>	0,71 *	-0,75*
<i>P. taeda</i>	0,21	-0,44*

* Correlação significativa à 5% de probabilidade de erro.

(-) O sinal negativo indica que a relação entre as variáveis é inversa.

A Tabela 28 mostra que os valores médios, observados no ensaio de flexão estática e no ensaio não destrutivo, foram estatisticamente iguais, mostrando que o ensaio não destrutivo é bom indicador da rigidez da madeira das espécies aqui estudadas, e pode avaliar a influência de diversas características físicas sobre esta propriedade.

TABELA 28 - COMPARAÇÃO DOS MOE'S OBTIDOS NOS ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA E NO MÉTODO NÃO DESTRUTIVO.

MÉTODO DE ENSAIO	MOE médio (kgf/cm ²)	MOE médio (Pa)	Desvio padrão	n
Ensaio não destrutivo	82808,92	8118,52	34862,55	100
Ensaio flexão estática	82670,00	8104,90	33481,35	100

C.V. = Coeficiente de variação (%);

n = Número de observações

Da mesma forma que no ensaio de flexão estática, foi observado que a rigidez da madeira do lenho adulto foi maior que a do lenho juvenil das duas espécies, e que a madeira de *Pinus elliottii* foi mais rígida que a madeira de *Pinus taeda*, (Tabela 29). A maior diferença de rigidez entre os lenhos da madeira de *Pinus elliottii*, indica mais uma vez a grande variação das características anatômicas e, por conseguinte, da massa específica aparente e propriedades mecânicas correlatas, quando comparada à madeira de *Pinus taeda*, que apresentou uma diferença menor, caracterizando uma madeira mais homogênea.

TABELA 29 - VALORES MÉDIOS DE FLECHA NOS LENHOS ADULTO E JUVENIL PARA AS ESPÉCIES ESTUDADAS.

ESPÉCIE	LENHO	FLECHA (cm)	Desvio padrão	n
<i>P. taeda</i>	Juvenil	0,87 *	0,48	25
	Adulto	0,66	0,25	25
<i>P. elliottii</i>	Juvenil	1,22 *	0,34	25
	Adulto	0,56	0,21	25

n = Número de observações

* Diferença significativa à 95% de probabilidade

Para efeito prático, os valores acima indicam que a madeira de *Pinus taeda* é mais apropriada para utilização em estruturas por apresentar uma variabilidade menor e, com isso, reduzindo o erro na determinação da flecha admissível.

4.3 CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS VISUAIS DA MADEIRA COM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS.

As propriedades mecânicas são influenciadas por diversos fatores. Alguns desses fatores podem ser traduzidos pelas características visuais, tais como: número de anéis de crescimento, largura de anéis de crescimento e porcentagem de lenho tardio.

A correlação entre as propriedades mecânicas e as características visuais mostra a importância de cada característica como indicadora da qualidade da madeira.

Na Tabela 30, é apresentada a matriz de correlação entre as características visuais e as propriedades mecânicas. Pode ser verificado que, de forma geral, as características visuais apresentaram boa correlação com o MOR, exceto para madeira de *Pinus taeda*. Apresentaram também, boa correlação com o MOE para a madeira de *Pinus elliottii*. Para *Pinus taeda*, esta relação foi baixa ou insignificante.

A madeira de *Pinus taeda*, provavelmente, possui uma variabilidade menor das características visuais, fazendo com que estas não se correlacionem satisfatoriamente com as propriedades mecânicas.

TABELA 30- CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS COM AS CARACTERÍSTICAS VISUAIS DA MADEIRA.

Espécie	Propriedade	Número médio de anéis de crescimento	Largura média dos anéis de crescimento	Porcentagem média de lenho tardio
<i>P. elliottii</i>	MOR (flexão)	0,81 *	-0,71 *	0,70 *
	MOE (flexão)	0,82 *	-0,76 *	0,71 *
<i>P. taeda</i>	MOR (flexão)	0,25	-0,22	0,18
	MOE (flexão)	0,37 *	-0,41 *	0,39 *
<i>P. elliottii</i>	MOE (comp.)	0,83 *	-0,72 *	0,33 *
	MOR (comp.)	0,31 *	-0,41 *	0,17
<i>P. taeda</i>	MOE (comp.)	0,43 *	-0,37 *	0,23
	MOR (comp.)	0,10	-0,09	0,18
<i>P. elliottii</i>	Cisal. Tangencial	0,15	-0,30	0,52 *
<i>P. taeda</i>	Cisal. Tangencial	0,00	-0,04	0,27
<i>P. elliottii</i>	Cisal. Radial	0,48*	-0,55*	0,40*
<i>P. taeda</i>	Cisal. Radial	0,28	-0,25	0,04
<i>P. elliottii</i> + <i>P. taeda</i>	FLECHA	-0,56 *	0,56 *	-0,53 *

* Correlação significativa à 5% de probabilidade de erro;

(-) Os sinais negativos indicam que as variáveis estão inversamente relacionadas.

Estes resultados seguem a tendência verificada por TRENDELEMBURG e MAYER-WEGELIN¹ citados por MUÑIZ (1993). MORESCHI (1975) também encontrou relações semelhantes entre a resistência e a porcentagem de lenho tardio.

No ensaio de compressão paralela à grã, os valores de R, indicam que o número e a largura dos anéis de crescimento são excelentes indicadores da rigidez de *Pinus elliottii*. Com a resistência e a elasticidade de *Pinus taeda*, estas características não foram bem relacionadas.

¹ TRENDELEMBURG, R e MAYER-WEGELIN, H. Das Holz als Rohstoff. München, Carl Hauser Verlag, 1955. 541p.

A porcentagem de lenho tardio não apresentou boa correlação com o MOE e com o MOR para as duas espécies, diferindo da maioria dos trabalhos levantados sobre qualidade da madeira, que afirmam existir correlações significantes.

A correlação do MOE, em compressão paralela à grã, com o número de anéis de crescimento, indicou que o mesmo não foi bom indicador da qualidade da madeira de *Pinus taeda*.

Ficou evidente, de acordo com os resultados apresentados, que a porcentagem de lenho tardio, foi a única característica visual que teve alguma correlação com a resistência ao cisalhamento tangencial da madeira de *Pinus elliottii*; as demais características tiveram pouca influência ou não foram significantes para nenhuma das duas espécies. Estes resultados confirmam as observações feitas por SPUUR e HSIUNG (1954), onde afirmam que a largura dos anéis de crescimento possui baixo grau de associação com a resistência, ou não existem, e contrariam os resultados obtidos por GURFINKEL (1973), o qual afirma que quanto maior a porcentagem de lenho tardio, maior a resistência, o que não é válido em se tratando de resistência ao cisalhamento.

De acordo com as correlações entre a tensão de cisalhamento radial e as características visuais da madeira das duas espécies, pode ser constatado que nenhuma das características em estudo foi considerada boa indicadora desta propriedade mecânica.

Estes resultados confirmam as observações feitas por KLOCK (1989), o qual afirma que apenas características visuais, tais como largura de anéis de crescimento, não são variáveis muito seguras para estimar a resistência da madeira.

Provavelmente em árvores de rápido crescimento e que não atingiram a maturidade, as características visuais variam muito, reduzindo sua correlação com as propriedades mecânicas.

A matriz de correlação (Tabela 30), mostrou ainda, que as características visuais estão pouco relacionadas com a flecha, e todas, indistintamente, possuíram a mesma importância como indicadoras da rigidez da madeira.

No ensaio não destrutivo, foi verificado que as características visuais estiveram relacionadas significativamente com a flecha. No entanto, elas não são suficientes para avaliar a rigidez das madeiras estudadas, uma vez que estas características podem ser consideradas como estimativas superficiais da elasticidade da madeira, servindo somente como parâmetros auxiliares na classificação da rigidez.

5 CONCLUSÕES

Com base na análise dos resultados obtidos, referentes à influência da massa específica aparente e do teor de umidade da madeira nas diferentes propriedades estudadas, e das correlações entre estas e as características visuais podemos concluir que:

1- As propriedades mecânicas da madeira apresentaram relacionamentos com tendência de variação exponencial negativa com o teor de umidade, e tendência de variação linear positiva com a sua massa específica aparente.

2- O Módulo de ruptura (MOR), foi mais influenciado pelo teor de umidade do que o Módulo de elasticidade (MOE).

3- O lenho adulto apresentou um aumento de resistência à flexão maior do que o lenho juvenil, quando a madeira foi seca à teores de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras.

4- O aumento de resistência ao cisalhamento tangencial e radial, à flexão estática e à compressão paralela à grã, foi maior na madeira de *Pinus elliottii*, sendo esta, mais sensível à variação do teor de umidade que a madeira de *Pinus taeda*, para a maioria das propriedades estudadas.

5- No ensaio de flexão estática, o aumento de resistência com a secagem de 30% à 15% de umidade, foi aproximadamente de 39%, maior que o aumento de rigidez, o qual foi de aproximadamente 20%. No ensaio de compressão, a secagem praticamente não alterou positivamente a rigidez, mas, aumentou significativamente a resistência das duas espécies.

6- O acréscimo de resistência com a secagem abaixo de 10% foi pequeno, não justificando, por isso, a secagem abaixo deste nível.

7- O ganho com a secagem foi maior para madeiras com maior massa específica aparente.

8- O melhor modelo para estimar as propriedades mecânicas das duas espécies, foi $\text{Log}(y) = b_0 + b_1 \gamma + b_2 U + b_3 U^2$, onde U representa o teor de umidade da madeira e γ a massa específica aparente.

9- Os valores médios da razão T_{lim}/T_{rup} para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, foram diferentes do valor 9/16, adotado como um dos coeficientes de segurança.

10- As características visuais podem ser consideradas úteis apenas como indicadoras da resistência à flexão da madeira de *Pinus elliottii*.

11- No ensaio não destrutivo, foi verificado que as características visuais estão relacionadas significativamente com a flecha, sendo portanto, parâmetros auxiliares na classificação da rigidez da madeira das duas espécies. O teor de umidade e a massa específica aparente também apresentaram correlações significativas com a flecha, mostrando que, com a diminuição do teor de umidade e com o aumento da massa específica, ocorre uma diminuição da flecha e um aumento da rigidez.

12- O ensaio não destrutivo é bom indicador da rigidez da madeira das espécies estudadas, e pode avaliar a influência de fatores como o teor de umidade e massa específica sobre tal propriedade.

13- O ensaio de flexão estática é o mais indicado para avaliação da rigidez da madeira das duas espécies, por apresentar valores mais baixos e com menor variabilidade.

A utilidade prática das conclusões apresentadas é a de que, a partir das equações obtidas pelo processo de regressão, pode-se estimar o acréscimo de resistência e rigidez para peças de madeira com qualquer teor de umidade e massa específica aparente, entender melhor o comportamento da madeira como material de construção e determinar as características que

podem ser utilizadas para se fazer uma classificação ideal e, juntamente com o processo de secagem da madeira, obter um melhor ganho econômico com menor impacto ambiental.

6 RECOMENDAÇÕES

Em relação ao exposto acima, recomenda-se que para classificação de madeira em relação a sua resistência, deve-se levar em consideração, além da massa específica, o teor de umidade, pois o conhecimento desta variável pode resultar em dimensionamentos mais econômicos. Recomenda-se também, que o estudo desenvolvido seja estendido à outras espécies, principalmente madeiras pesadas, utilizadas em construção civil, além da inclusão de outras variáveis como indicadores da qualidade da madeira, tais como, número e dimensões dos nós e o ângulo de inclinação da grã, etc.

Outros estudos importantes também são recomendados, como a avaliação do ganho econômico e o estabelecimento da relação custo/benefício com a secagem da madeira para fins estruturais, e o desenvolvimento de uma metodologia apropriada para minimizar a ação de fatores indesejáveis que possam influir nos resultados a serem levantados, tais como, métodos mais precisos de controle e avaliação do teor de umidade da madeira.

7 ANEXOS

ANEXO 1 - FORMULÁRIO UTILIZADO NA AQUISIÇÃO DOS DADOS.

Espécie	Número de anéis	Largura de anéis (mm)	% de lenho tardio	Dimensões (cm)	Teor de umidade (%)	Massa (g)	Carga máxima (kgf)	Deformação (cm)	Tensão no limite de prop.

ANEXO 2 - COEFICIENTES E SEUS RESPECTIVOS VALORES DE "t", PARA AS VARIÁVEIS DO MODELO SELECIONADO PARA ESTIMATIVA DO MOE NO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA

Espécie	Parâmetro	Coefficiente	"t" de Student
<i>Pinus elliottii</i>	Constante b_0	4,01	19,71 *
	U	-0,56	-0,53
	γ	1,86	8,58 *
	U^2	-1,97	-1,34
<i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	4,16	19,58 *
	U	-1,07	-0,09
	γ	1,83	6,10 *
	U^2	-0,67	-0,29
<i>Pinus elliottii</i> + <i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	3,97	28,89 *
	U	0,42	0,61
	γ	2,04	8,78 *
	U^2	-2,70	-1,93 *

* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

ANEXO 3 - COEFICIENTES E SEUS RESPECTIVOS VALORES DE "t", PARA AS VARIÁVEIS DO MODELO SELECIONADO PARA ESTIMATIVA DO MOR NO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA

Espécie	Parâmetro	Coefficiente	"t" de Student
<i>Pinus elliottii</i>	Constante b_0	2,28	14,30 *
	U	-1,76	-1,28
	γ	1,30	7,57 *
	U^2	0,47	0,10
<i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	2,11	13,53 *
	U	0,281	0,74
	γ	1,35	6,36 *
	U^2	-3,35	-1,42
<i>Pinus elliottii</i> + <i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	2,07	21,55 *
	U	-0,10	0,21
	γ	1,55	9,57 *
	U^2	-1,60	-1,63

* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

ANEXO 4 - COEFICIENTES E SEUS RESPECTIVOS VALORES DE "t", PARA AS VARIÁVEIS DO MODELO SELECIONADO PARA ESTIMATIVA DO MOE NO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA

Espécie	Parâmetro	Coefficiente	"t" de Student
<i>Pinus elliottii</i>	Constante b_0	4,03	20,51 *
	U	-0,38	-1,29
	γ	2,17	5,39 *
	U^2	0,33	1,27
<i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	4,14	28,48 *
	U	0,04	0,10
	γ	2,03	6,69 *
	U^2	0,17	0,28
<i>Pinus elliottii</i> + <i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	4,27	36,77 *
	U	0,07	0,38
	γ	1,64	7,00 *
	U^2	-0,09	-0,50

* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

ANEXO 5 -COEFICIENTES E SEUS RESPECTIVOS VALORES DE "t", PARA AS VARIÁVEIS DO MODELO SELECIONADO PARA ESTIMATIVA DO MOR NO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA

Espécie	Parâmetro	Coefficiente	"t" de Student
<i>Pinus elliottii</i>	Constante b_0	2,11	14,30 *
	U	-1,44	-1,28
	γ	1,22	7,57 *
	U^2	0,95	0,11
<i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	2,07	27,03 *
	U	-1,80	-8,19 *
	γ	1,35	8,45 *
	U^2	2,09	6,32 *
<i>Pinus elliottii</i> + <i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	2,10	26,97 *
	U	-1,18	-9,06 *
	γ	1,17	7,46 *
	U^2	0,75	6,28 *

* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

ANEXO 6 - COEFICIENTES E SEUS RESPECTIVOS VALORES DE "t", PARA AS VARIÁVEIS DO MODELO SELECIONADO PARA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA DIREÇÃO TANGENCIAL.

Espécie	Parâmetro	Coefficiente	"t" de Student
<i>Pinus elliottii</i>	Constante b_0	1,78	13,07 *
	U	-1,08	-5,11 *
	γ	0,46	1,82
	U^2	0,73	3,44 *
<i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	1,51	9,41 *
	U	-1,86	-4,84 *
	γ	1,18	3,43 *
	U^2	1,82	3,78 *
<i>Pinus elliottii</i> + <i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	1,61	16,35 *
	U	-1,22	-6,48 *
	γ	0,81	4,19 *
	U^2	0,92	4,62 *

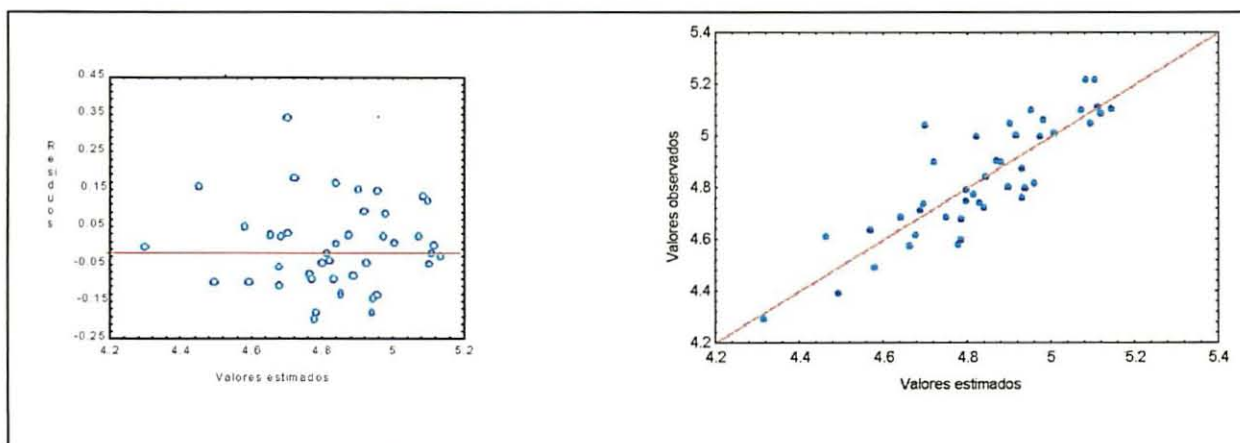
* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

ANEXO 7 - COEFICIENTES E SEUS RESPECTIVOS VALORES DE "t", PARA AS VARIÁVEIS DO MODELO SELECIONADO PARA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO NA DIREÇÃO TANGENCIAL AOS ANÉIS DE CRESCIMENTO.

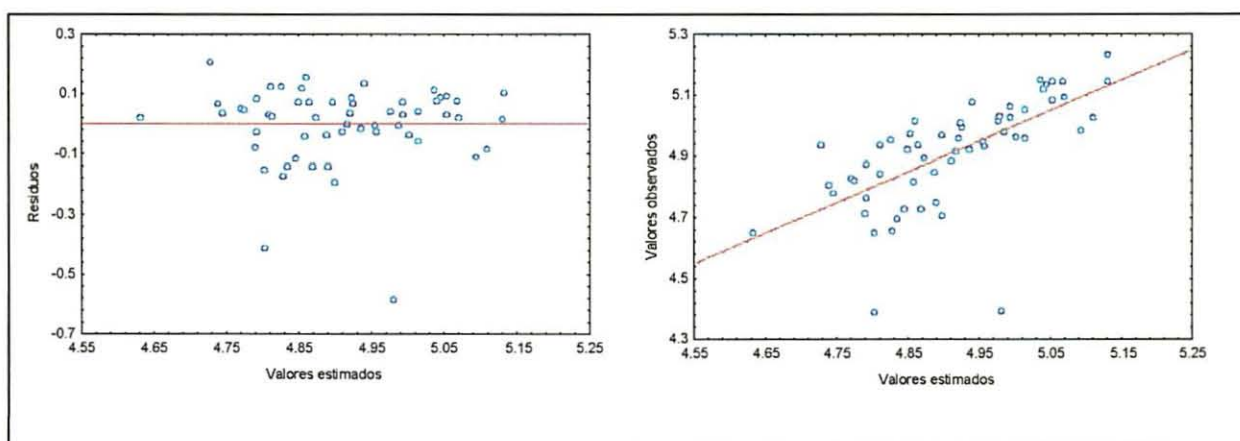
Espécie	Parâmetro	Coefficiente	"t" de Student
<i>Pinus elliottii</i>	Constante b_0	1,48	13,51 *
	U	-1,37	9,97 *
	γ	1,14	5,47 *
	U^2	0,91	6,46 *
<i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	1,57	7,01 *
	U	-1,80	-3,56 *
	γ	1,01	1,95
	U^2	1,80	2,73 *
<i>Pinus elliottii</i> + <i>Pinus taeda</i>	Constante b_0	1,52	13,79 *
	U	-1,38	-6,74 *
	γ	1,05	4,60 *
	U^2	0,97	4,48 *

* Significativo à 5% de probabilidade de erro.

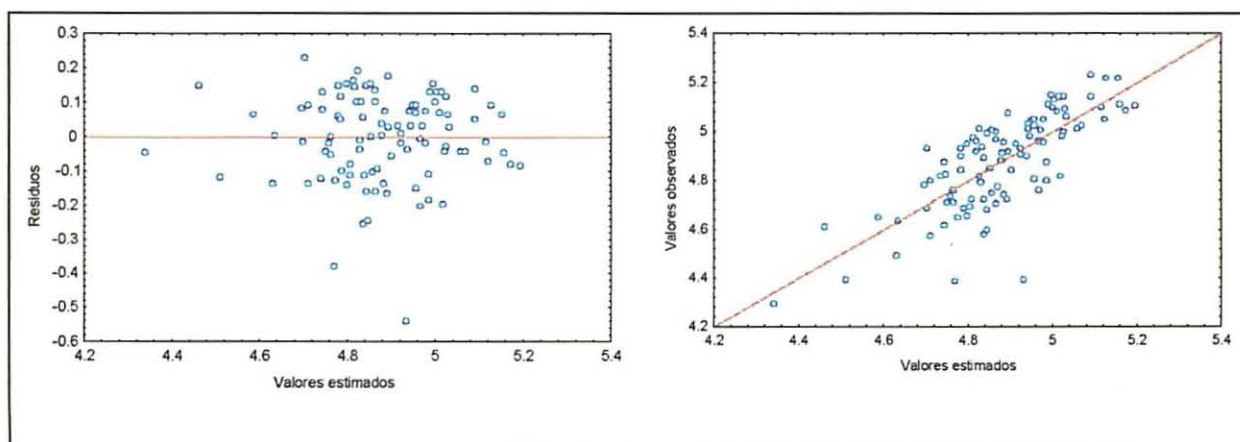
ANEXO 8 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOE EM FLEXÃO DE *Pinus elliottii*



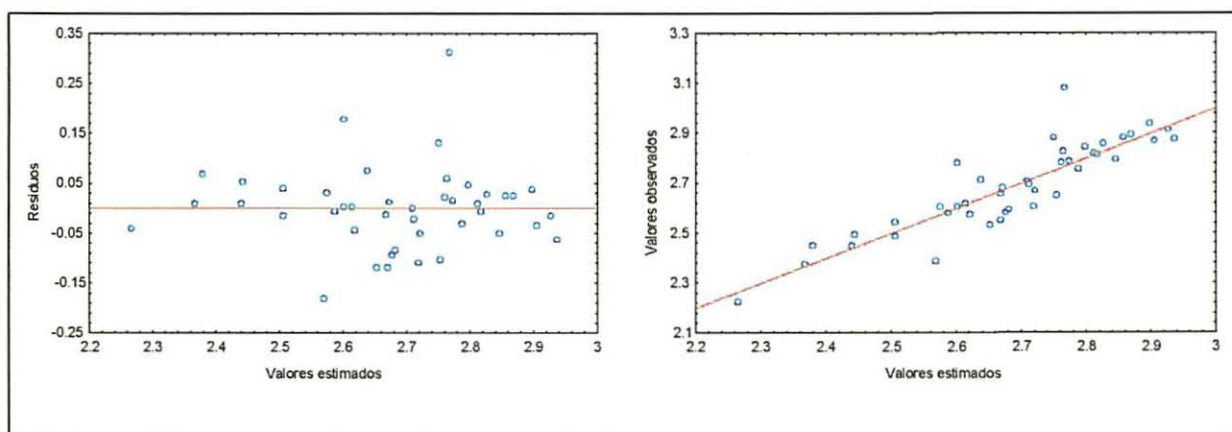
ANEXO 9 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOE EM FLEXÃO DE *Pinus taeda*.



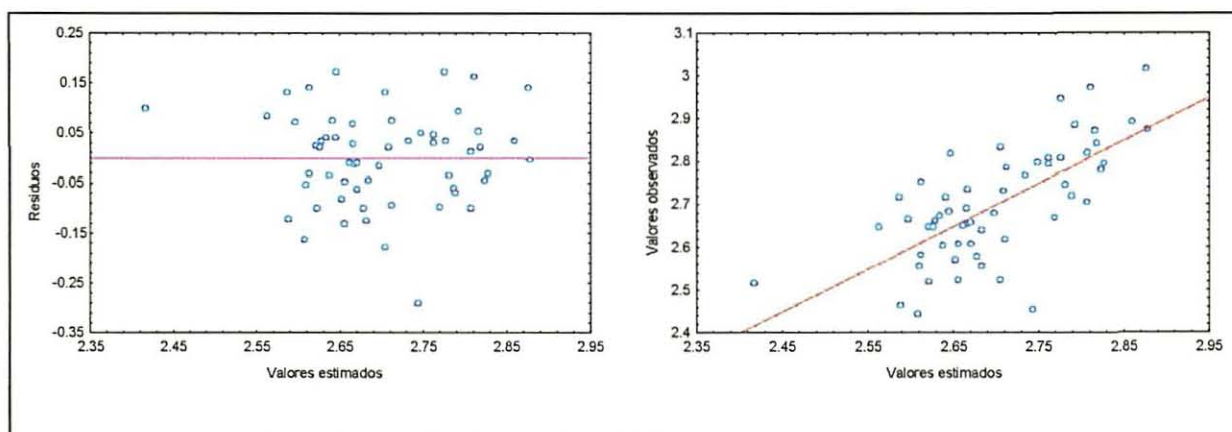
ANEXO 10 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOE EM FLEXÃO DAS DUAS ESPÉCIES



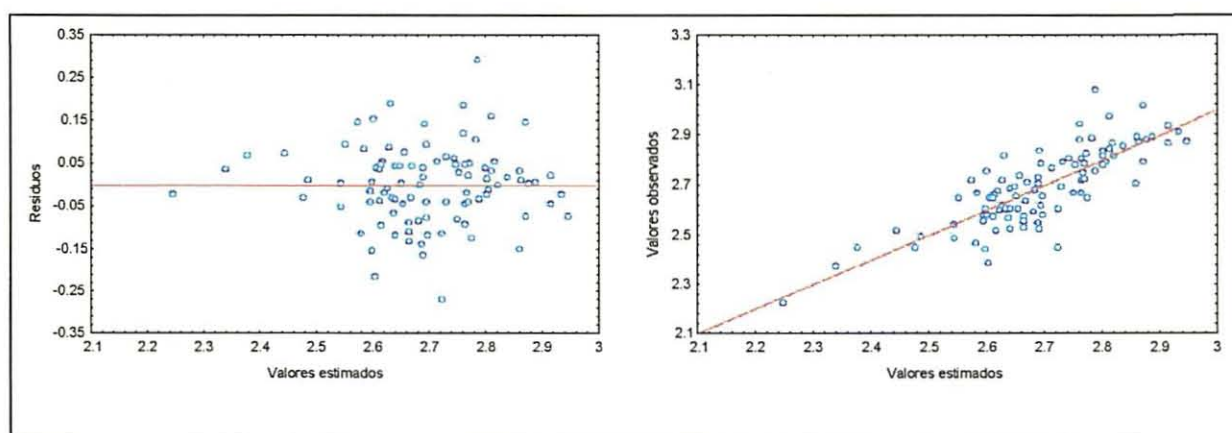
ANEXO 11 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOR EM FLEXÃO DE *Pinus elliottii*.



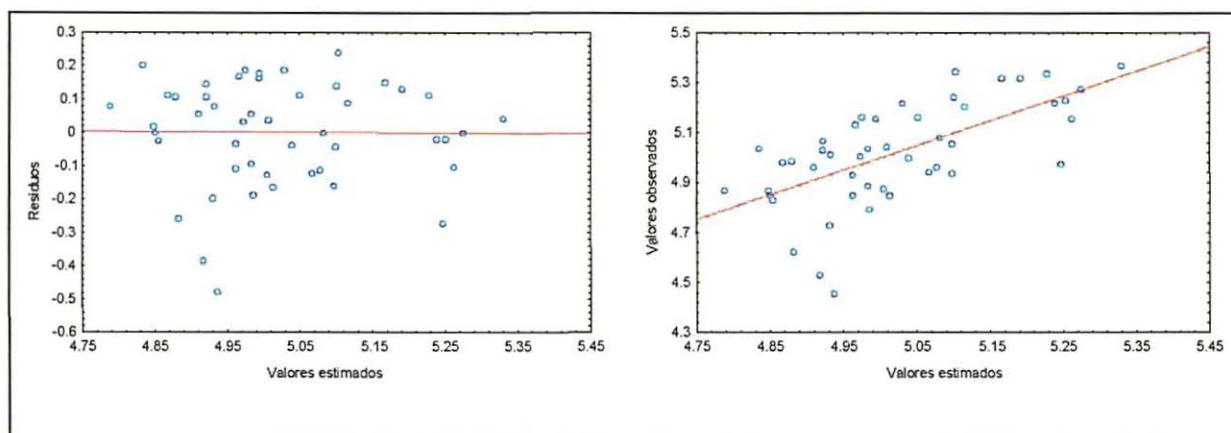
ANEXO 12 -RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOR EM FLEXÃO DE *Pinus taeda*.



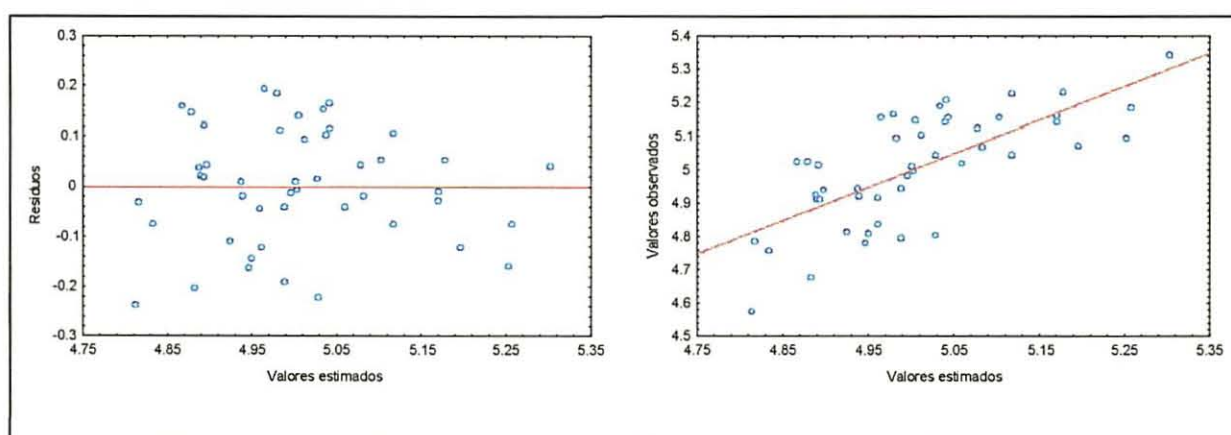
ANEXO 13 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOR EM FLEXÃO PARA AS DUAS ESPÉCIES



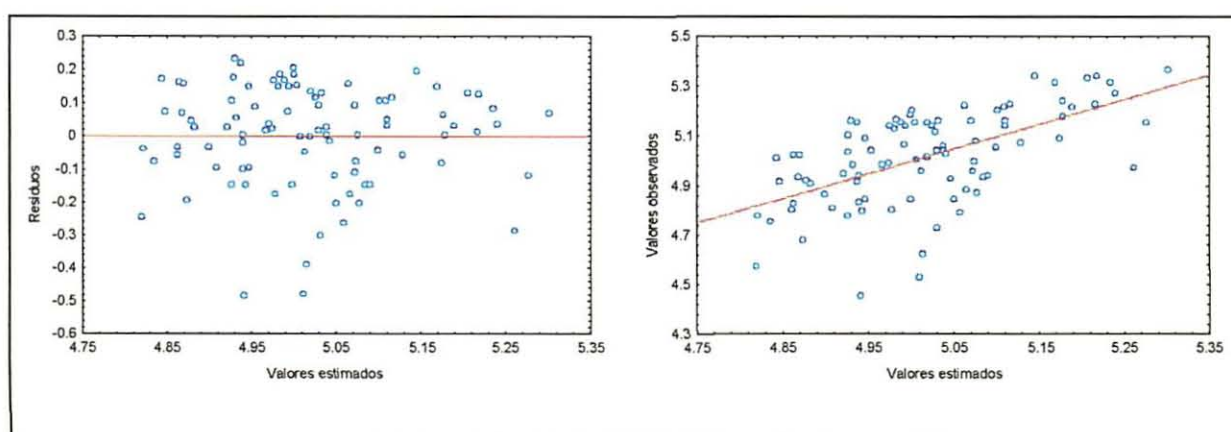
ANEXO 14 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOE NO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA
PARA *Pinus elliottii*



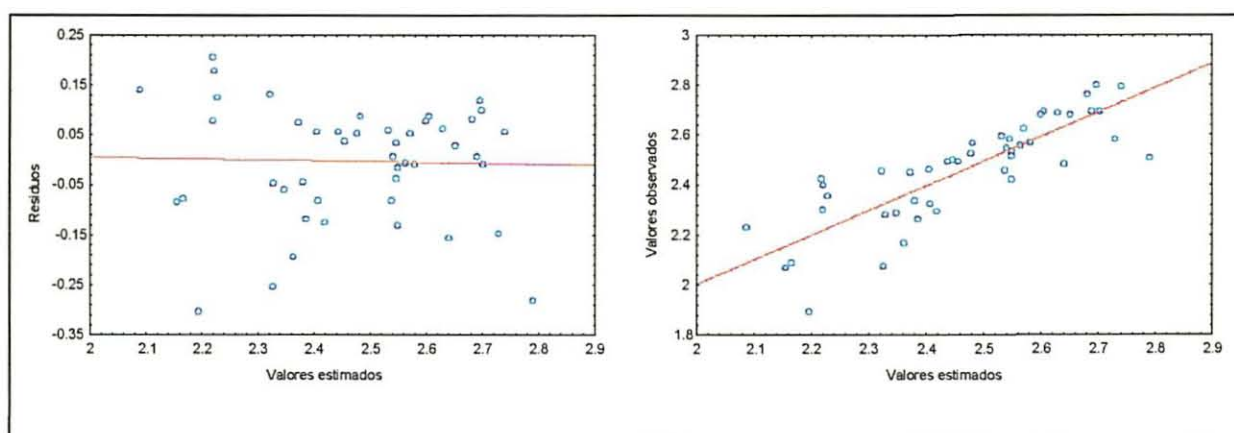
ANEXO 15 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOE NO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA
PARA *Pinus taeda*.



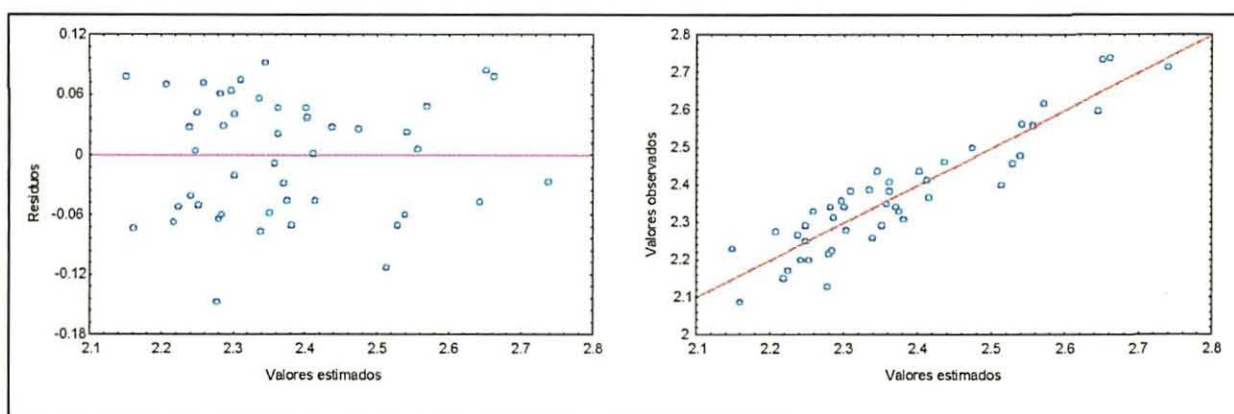
ANEXO 16 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOE NO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA
PARA AS DUAS ESPÉCIES



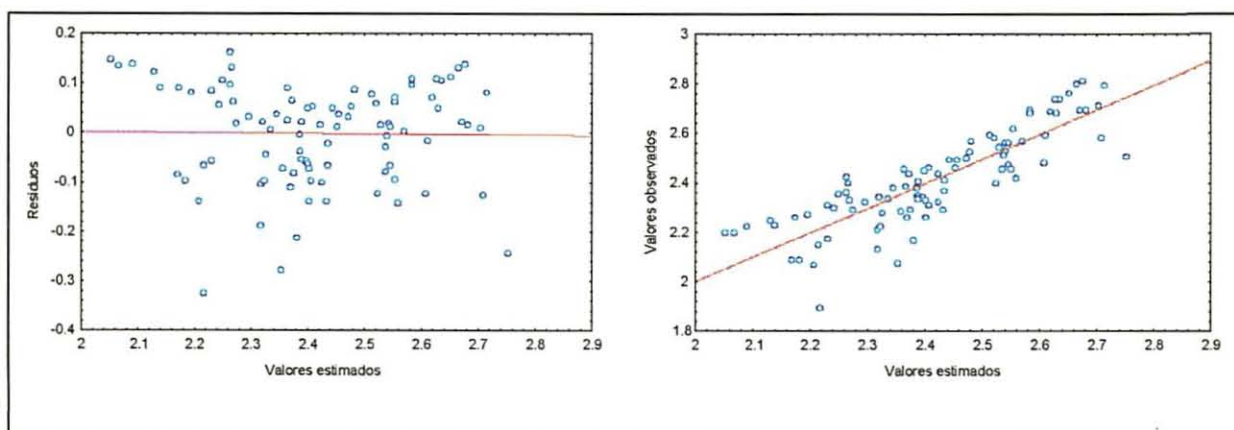
ANEXO 17 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOR NO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA PARA *Pinus elliottii*.



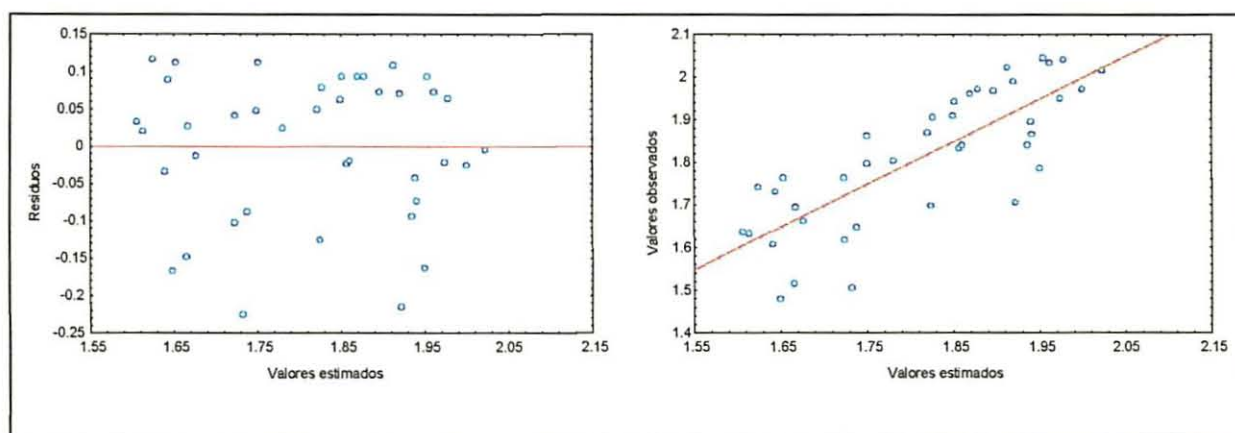
ANEXO 18 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOR NO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA PARA *Pinus taeda*.



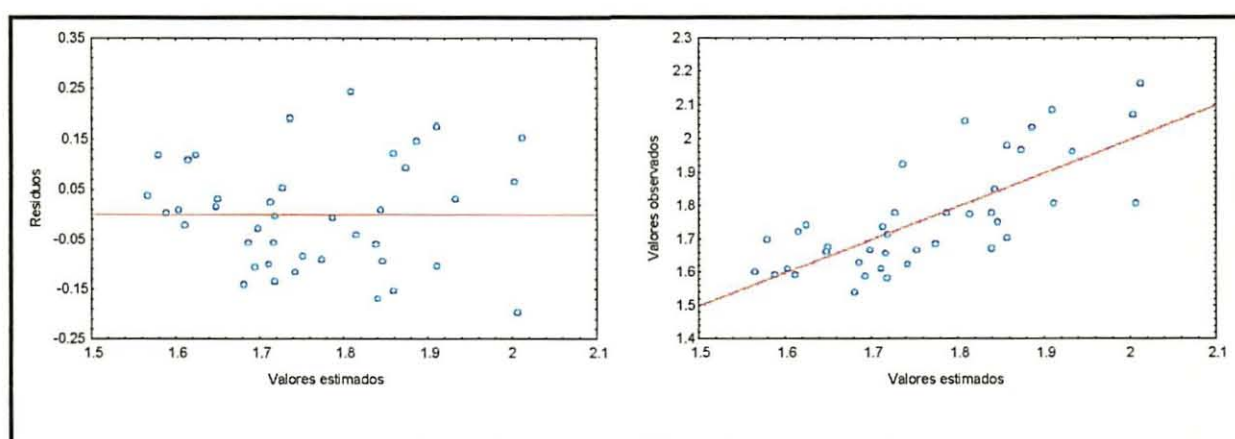
ANEXO 19 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DO MOR NO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA PARA AS DUAS ESPÉCIES.



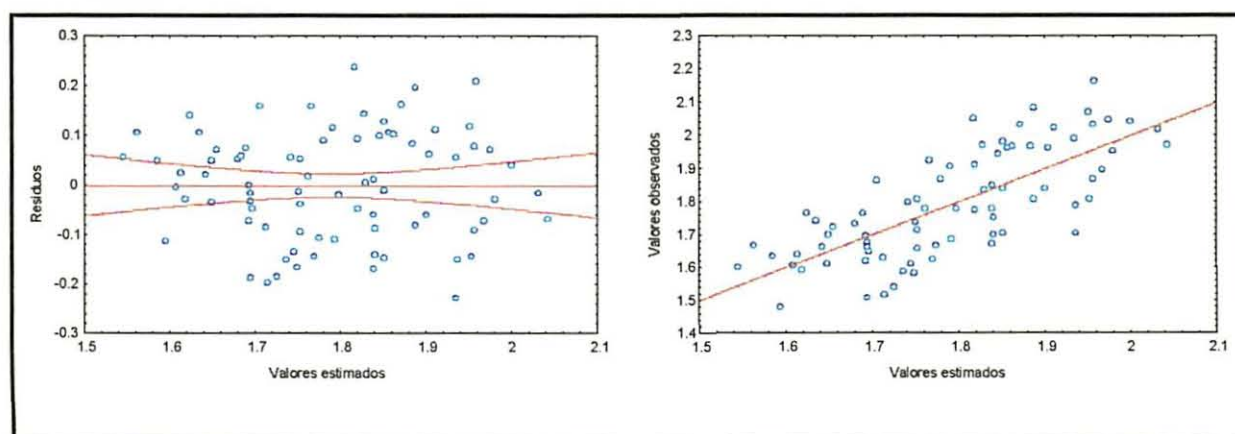
ANEXO 20 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO TANGENCIAL P/ *Pinus elliottii*



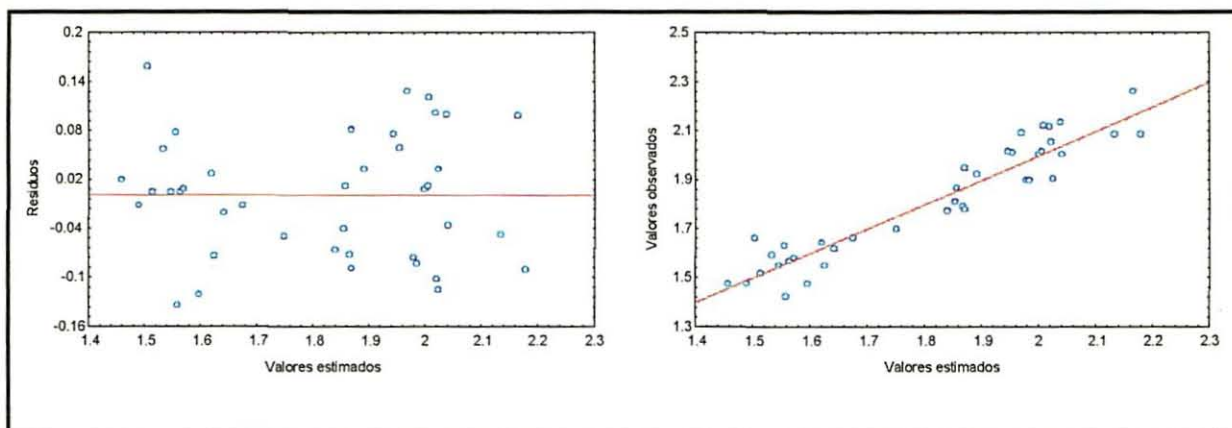
ANEXO 21 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DA TENSÃO de CISALHAMENTO TANGENCIAL P/ *Pinus taeda*



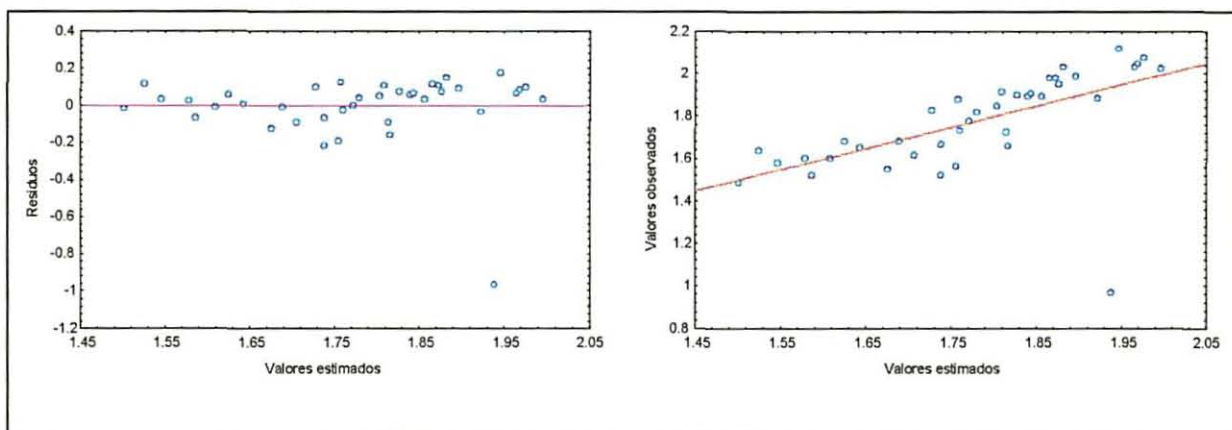
ANEXO 22 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO TANGENCIAL P/ AS DUAS ESPÉCIES.



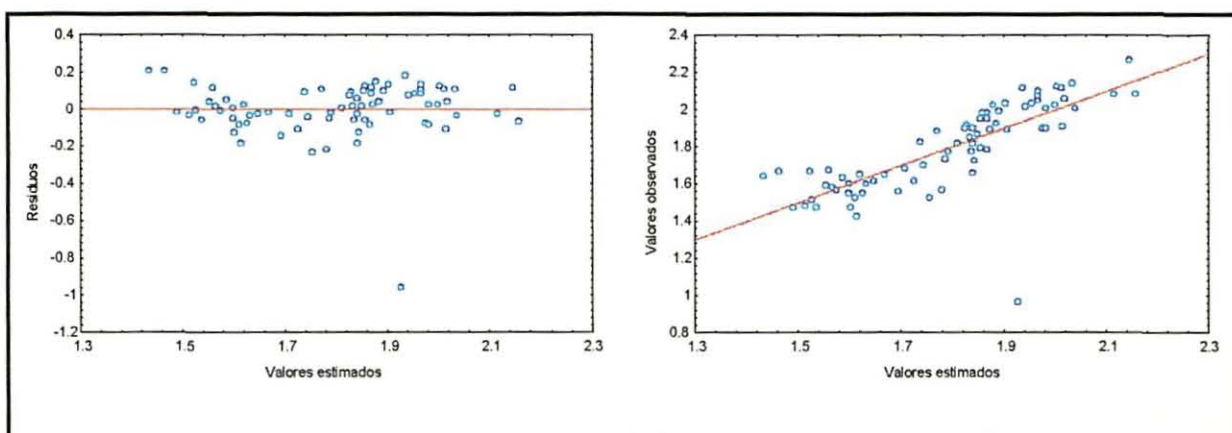
ANEXO 23 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL P/ *Pinus elliottii*.



ANEXO 24 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL P/ PINUS TAEDA.



ANEXO 25 - RESÍDUOS DA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE CISALHAMENTO RADIAL P/ AS DUAS ESPÉCIES.



8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRICHELO, L.E.G. A utilização da madeira na fabricação de celulose. Circular técnica, IPEF, Piracicaba, n.20,p. 121-6, 1980.
- BARTZ, A. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, in: Congresso florestal brasileiro, 2. Curitiba, 1973.
- BAUER, L.A. FALCÃO. Materiais de construção. 2v. 2 ed. Rio de Janeiro. LTC, 1985. 705p.
- BENDTSEN, B. A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. For. Prod. Journal, 28 (10): 61-72, 1978.
- BOLZA, E; KLOOT, N. H. The mechanical properties of 174 Australian timbers. Camberra: C.S.I.R.O. Div. For. Prod., 1963 (Tech. Paper, 25).
- BROWN, H. P.; PANSHIN, A. J. & FORSAITH, C. C. Textbook of wood technology-2. New York: McGraw-Hill, 1952. 783p.
- BROWN, N. C. ; BETHEL, J. S. La indústria maderera. México, Wiley, 1965. 397p.
- CHOONG, E. T. *et alli*. Cultural treatment and wood-type effects on wood properties of timber. Wood and fiber science, v.21, n.2, p.193-206, 1989.
- COVINGTON, S. A. & FEWEL, A. R. The effect change in moisture content on the geometrical properties, modulus of elasticity and stiffness of timber. Garston, Building research establishment, Department of the environment. 1975.
- DADSWELL, H. E. Wood structure variations occurring during tree growth and their influence on properties. Wood Science, v.1, p.11-32, 1958.
- DADSWELL, H. E. & NICHOLS, J.W.P. Assessment of wood qualities for tree breeding. 1. *Pinus elliottii* from Queensland. Div. For. Prod. Technol. Pap. For. Prod. Aust., v.4, 16p. Apud Forestry Abstracts, v.21, n.2, 1960.
- DESCH, H. E. Timber, its structure and properties. London: McMilan, 1982. 350p.
- DINWOODIE, J. M. Tracheid and fiber length in timber. A review of literature. J. Soc. For., Londres, v.36, n.2, p.25-144, 1961.
- DURLO, M. A. Determinação de variáveis para caracterização de *Pinus elliottii* com finalidade estrutural. In: Congresso florestal estadual (6: 1988: Nova Prata): anais Prefeitura Municipal, 1988. v.2, p.1097-1113.
- EDLIN, H. L. The Sumerwood springwood ratio in conifers. Forestry, London, v.38, n.1, p.91-112, 1965.

- ELLIOTT, K. G. Wood density in conifers. Oxford: Commonwealth Forestry Bureaus, 1970. (Tec. comun., 8).
- FIELDING, J. M. The Influence of Silvicultural Practices on wood properties. International review of forestry research, v.2, p.95-126, 1967.
- GARCIA, J. N. Madeira estrutural de *Pinus*. Silvicultura, n.35, p.19-23, 1984.
- GEIGER, K. Baruscksichtigung der schubuerformung bei der Ermittlung des elastizitätsmodulus van Holz in statischen. Biegeversuch. Holztechnologie. v.2, n.2, p.102-106. 1950.
- GERHARDS, C. C. Effects of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analizys of imediate effects. Wood and fiber, v.14, n.1, p.4-36, 1982.
- GERHARDS, C. C. Dependence of MOE on strength ratio and specific gravity: 4-inch-thick Southern Pines, Forest Products Journal, (6): 37-38, 1970.
- GURFINKEL, G. Wood engineering. New Orleans: Southern Forest Products Association, 1973. 573p.
- HELLMEISTER, J. C. Sobre a determinação das características físicas da madeira. São Carlos, Tese de Doutorado, LAMEN-EESC-USP, 1973.161 P.
- HOYLE, R. J. Wood technology in the design of structure. 3 ed. Missoula, Montana, Montaim press, 1972. 370p.
- JOHNSON, J. W. Relationship among modulus of elasticity and rupture seasoned and unseasoned coast-type Douglas fir seasoned west hemlock. Symposium Nondestructive testing of wood. v.2. Proceedings. 1965.
- KLOCK, U. Qualidade da madeira de *Pinus oocarpa* Shiede e *Pinus caribae* Morelet var. *Hondurensis*, Barr e Golf. Curitiba, 1989. 143p. Tese de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal
- KNIGGE, W.; SCHULZ, H. Growndise der Forestbenutung. Varlang Paul Parey, Hamburg and Berlim, 1966. 584p.
- KOCH, P. Utilization of Southern Pines. Agriculture Handbook, 1972. 420p.
- KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ Jr, W. A. Principles of wood science and technology. Berlim. Springer, 1968. 2v.
- KAVERS, G. M. The strength properties of timber. In: The Principles risborough Laboratory of the Building Research establishment. The strength properties of timber. Lancaster, Mtp construction, p. 1-86, 1974.
- LARSON, P. R. Wood formation and the concept of wood quality. New Haven. Yale University. School of forestry, 1969. 53p.

- LIMA, J. T. Influência do teor de umidade nas propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. Universidade Federal de Viçosa, 1983, 58p.
- MECLAIN, T. E. *et alli*. The influence of moisture content on the flexural properties of Southern Pine dimensional lumber. U.S.D.A., Madison, 1984. 40p.
- MENDES, A. P. Resistência da madeira ao cisalhamento. São Carlos, 1984. 157p. Dissertação (mestre-Engenharia de estruturas) - Lamen-EESC-USP.
- MENDONÇA, M. A. Características da madeira de *Pinus elliottii* com diferentes idades e propriedades do papel. Curitiba, 1982. 124p. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós graduação em Engenharia Florestal.
- MEYER, R. W.; BARTON, G. M. A relationship between collapse and extractives in western Red cedar. Forest Products Journal, Madison, v.21 p. 58-60, 1968.
- MORESCHI, J. C. Levantamento da qualidade da madeira em plantações artificiais de "*Pinus elliottii*", nos estados do sul do Brasil. Tese de Mestrado. Curso de Pós graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1975. 162 p.
- MUÑIZ, G. I. B. Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm e *Pinus taeda* L.. Curitiba, 1993. 235 p. Tese - Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós graduação em Engenharia Florestal.
- NOAK, D. Beziehung zwischen dem Rohstoff - Eigenschaften und der an der Verwendung. Holz als Rohstoff und Werkstoff, v.34, p.121-126, 1976.
- PARKER, H. Simplified design of structural timber. 2nd ed., New York, John Wiley, 1963. 265 p.
- PEARSON, N. C.; GILMORE, R. C. Characterization of the strength of juvenile wood of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). Forest Products Journal, Madison, v.21, n.1, p.23-31, 1971.
- PEIRCE, F. T. A two-phase theory of the absorption of water vapour by cotton cellulose. Journal of textile institute. 20: 133-150. 1929.
- PETTRUCCI, E. G. R. Madeiras. 2ed. São Paulo, Gremio Politécnico, 1980. 62 p.
- PIGOZZO, J. C. Influência da umidade e da densidade na resistência a compressão da madeira. São Carlos, 1983. 141 p. Tese (mestre - Engenharia de estruturas), LAMEN - EESC - USP.
- PFEIL, WALTER. Estruturas de madeira. 5ed., Rio de Janeiro. LTC. 1989. 395 p.
- RINCOSKI, C. R. Efeito da resinação nas características da madeira de *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii*. Tese de mestrado. Curso de Pós graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1994. 112 p.

- SCHINIEWIND, A. P. Tensile strength perpendicular to grain as a function of moisture content in California Black Oak. Forest Products Journal, v.12, n.5, p. 249-252, 1962.
- SIAU, J. F. Flow in wood. New York. Syracuse University Press. 1971. 131p.
- SKAAR, C. Water in wood. Syracuse University Press, New York, 1972. 149 p.
- SPUUR, S. H.; HSIUNG, W. Growth rate and especific gravity in conifers. J. For., v.52, n.3, p. 191-192, 1954.
- STAMM, A. J. Wood and celulose science. New York. Ronald press. 1964. 549 p.
- TANAAMI, R. G. Influência da umidade e da densidade em propriedades de resistência e elasticidade da madeira. São Carlos, 1986. 199 p. Tese (mestre - Engenharia de estruturas), LAMEN-EESC-USP.
- TARAS, M. A. Some wood properties os slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.) and their relationship to age and height within the stem. Agriculture, v.26, n.2, p. 559-600.1965.
- TARAS, M. A.; SAUCIER, J. R. Influence of extractives on especific gravity of Southern pine. Forest Products Journal, Madison, v.17, p. 97-99. 1967.
- TAYLOR, F. W. Effect of extration on the volume dimensions and especific gravity of solid wood blocks. Wood science, Madison, v.6, p. 396-404, 1974.
- TIEMANN, H. D. Wood technology, constitution, properties and uses. 3ed., London, Pitman, 1951. 396 p.
- TOMASELLI, I. Qualidade da madeira de *Pinus elliottii*, *Pinus taeda* e *Araucária angustifolia* e sua correlação com as propriedades do papel. Relatório final. Convênio FINEP/UFPr, n.18/79, Curitiba, 1979. 161 p.
- TURNBULL, J. M. The relationship between modulus of rupture and weight in South African grown pine timber. Journal of the South African Forestry association, n.7, p. 67-77, 1941.
- U.S.D.A. Wood Handbook. Wasington. U. S. Government Priting Office, 1958. 528p.
- VORREITER, L. Holztechnologisches handbuch. Band 1. Wien. Verlag George Fromme, 1949. 548 p.
- WANGAARD, F. F. The mechanical properties of wood. London. Chapman & Hall, 1950. 377 p.
- WILSON, T. R. C. Strength-moisture relation for wood. Wasington, D.C., U.S.D.A. Technical bulletin, n.282, 1932. 88 p.
- ZOBEL, B. *et alli*. Core or juvenile wood of loboly and slash pine trees. TAPPI, V.42, N.5, P. 345-356, 1959.

ZOBEL, B. Wood properties as affected by changes in the wood supply of southern pines.

TAPPI, Atlanta, v.59, n.4, p.126-128, 1976.